

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra informatiky

# **Spektrální propustnost transparentních materiálů**

## **Spectral transmission of transparent materials**

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michal Jurečka**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika

Téma: **Spektrální propustnost transparentních materiálů**  
**Spectral Transmission of Transparent Materials**

Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

Spektrální propustnost je jedním z klíčových parametrů fotonických materiálů. Omezte úlohu na vybrané polymerní materiály.

Diplomovou práci vypracujte podle následujících bodů:

1. Popište obecně interakci viditelného světla s transparentními materiály.
2. Popište měřicí metody měření propustnosti vhodné pro polymerové materiály v automotive.
3. Navrhněte a realizujte vhodnou experimentální setavu pro měření spektrální propustnosti vybraných polymerových vzorků.
4. Měření spektrální propustnosti realizujte pro polymer PDMS s luminoforem.
5. Statisticky zpracujte naměřené hodnoty a porovnejte dosažené výsledky s katalogovými hodnotami pro minimálně jednu vlnovou délku.

### Seznam doporučené odborné literatury:

[1] Fuka, J., Havelka, B.: *Optika*. SPN Praha 1960

Saleh, B.E.A., Teich, M.C.: *Fundamentals of Photonics*. J.Wiley and Sons, New York, 2007, ISBN: 987-0-471-35832-9

[2] Adams, Ch.S., Hughes, I.F.: *Optics [2f (From Fourier to Fresnel)]*. OUP Oxford, Oxford, 2018, ISBN-13: 978-0198786795

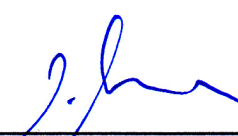
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020




  
prof. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 15. května 2020

  
.....

Podpis autora

## **Prohlášení zástupce spolupracující právnické nebo fyzické osoby**

Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v magisterských programech VŠB-TU Ostrava.

Dne: *13. května 2020*

.....

podpis zástupce



Rád bych poděkoval prof. RNDr. Vladimírovi Vašinkovi, CSc. za odbornou pomoc při vytváření této práce. Dále bych chtěl poděkovat Mgr. Janu Jargusovi za pomoc v laboratoři a jeho zkušenosti s PDMS a luminofory. Mé díky patří také Ing. Lukáši Hájkovi za jeho cenné rady a vstřícnost. Taktéž bych rád poděkoval společnosti Varroc Lighting Systems s.r.o. za poskytnutí veškerých potřebných prostředků pro uskutečnění této práce.

## **Abstrakt**

Cílem této práce je přesným způsobem zjistit spektrální propustnost transparentních materiálů dodaných firmou Varroc Lighting Systems s.r.o. Jedná se o polymery polymetylmetakrylát a polykarbonát ve dvou různých podobách. Úlohou praktické části je nalezení experimentální sestavy pro přesné měření spektrální propustnosti, správné vyhodnocení a interpretace výsledků, a také ověření korektnosti výsledků pomocí různých způsobů. Mimo jiné se práce zabývá teoretickým předpokladem ohledně propustnosti luminoforu, popisuje důsledky tohoto předpokladu a ověření jeho správnosti.

**Klíčová slova:** spektrální propustnost; spektrum; absorbance; transparentní materiály; polymery, spektroskopie, spektrometr; luminofor; spektrofotometrie

## **Abstract**

The aim of this thesis is to find out spectral transmission of transparent materials supplied by Varroc Lighting Systems Ltd. These transparent materials are polymers, more precisely acrylic and polycarbonate in two different forms. The task of the practical part is to design experimental set for accurate measurement of spectral transmission, correctly evaluate and interpret results and also verification of their correctness. Apart from this, the thesis examines the theoretical assumption of transmission of luminophore, implications of this assumption and also the verification of its validity.

**Keywords:** spectral transmittance; spectrum; absorbance; transparent materials; polymers; spectroscopy; spectrometer; luminophore; spectrophotometry

# Obsah

<b>Seznam použitých zkratk a symbolů</b>	<b>9</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>10</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>12</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>13</b>
<b>2 Základní optické vlastnosti</b>	<b>14</b>
2.1 Vlnové a Maxwellovy rovnice . . . . .	14
2.2 Index lomu . . . . .	15
2.3 Lom a odraz světla . . . . .	16
2.4 Beer-Lambertův zákon . . . . .	17
2.5 Interakce světla s transparentními materiály . . . . .	18
2.6 Spektroskopie . . . . .	19
2.7 Luminiscence . . . . .	20
<b>3 Spektrometr</b>	<b>22</b>
3.1 Štěrbina . . . . .	23
3.2 Difrakční mřížka . . . . .	23
3.3 Detektor . . . . .	24
<b>4 Transparentní materiály</b>	<b>26</b>
4.1 PC . . . . .	26
4.2 PMMA . . . . .	26
4.3 PDMS . . . . .	27
<b>5 Metodika měření</b>	<b>28</b>
5.1 Způsoby měření spektrální propustnosti využívané v automotive . . . . .	28
5.2 Metodika měření praktické části . . . . .	29
5.3 Měření spektrální propustnosti bez Fresnelových odrazů . . . . .	30
5.4 Zpracování a zobrazení naměřených dat . . . . .	31
<b>6 Měření spektrální propustnosti transparentních materiálů</b>	<b>32</b>
6.1 Použité přístroje . . . . .	32
6.2 Popis měřených transparentních materiálů . . . . .	32

<b>7</b>	<b>Měření spektrální propustnosti transparentních materiálů ve formě destiček</b>	<b>34</b>
7.1	Nepřesná verze měření spektrální propustnosti . . . . .	34
7.2	Finální verze měření spektrální propustnosti . . . . .	35
<b>8</b>	<b>Výsledky měření spektrální propustnosti barevných destiček</b>	<b>37</b>
8.1	Ověření naměřených dat pro materiál PMMA Altuglas V825T 18242 . . . . .	38
8.2	Ověření korektnosti dat na simulacích . . . . .	44
<b>9</b>	<b>Měření spektrální propustnosti transparentních materiálů ve formě tyčinek</b>	<b>46</b>
9.1	Nepřesné verze měření spektrální propustnosti . . . . .	46
9.2	Přesná verze měření spektrální propustnosti . . . . .	49
9.3	Skutečná světelná trasa v měřených tyčinkách . . . . .	51
<b>10</b>	<b>Výsledky měření spektrální propustnosti tyčinek</b>	<b>52</b>
10.1	Ověření korektnosti dat spektrální propustnosti tyčinek . . . . .	53
<b>11</b>	<b>Měření spektrální propustnosti luminoforu</b>	<b>55</b>
11.1	Teoretický předpoklad . . . . .	55
11.2	Praktická realizace . . . . .	57
<b>12</b>	<b>Závěr</b>	<b>63</b>
	<b>Literatura</b>	<b>65</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>67</b>
A	Výsledné grafy spektrální propustnosti ve formě destiček . . . . .	67
B	Výsledné grafy spektrální propustnosti ve formě tyčinek . . . . .	69

## Seznam použitých zkratk a symbolů

PC	– Polykarbonát
PMMA	– Polymethylmetakrylát
PDMS	– Polydimetylsiloxan
LED	– Light Emmitting Diode
LCD	– Liquid Crystal Display
UV	– Ultraviolet
IR	– Infrared
FRET	– Fluorescence Resonance Energy Transfer
USB	– Universal Serial Bus
CCD	– Charge-Coupled Device
DMC	– Digital Micromirror Device
InGaAs	– Indium Gallium Arsenide
FWHM	– Full Width at Half Maximum

## Seznam obrázků

1	Snellův zákon . . . . .	16
2	Závislost koncentrace složky na absorpci [7] . . . . .	18
3	Spektrometr . . . . .	22
4	Využití integrační koule pro měření spektrální propustnosti [21] . . . . .	29
5	Útlumy na měřené trase . . . . .	31
6	Dva druhy měřených materiálů . . . . .	33
7	Schéma měření propustnosti pomocí integrační koule . . . . .	34
8	Adaptér pro uchycení optického vlákna s integrační koulí . . . . .	35
9	Schéma měření propustnosti ve volném prostředí . . . . .	35
10	Konica Minolta CM-5 [18] . . . . .	36
11	PMMA Altuglas V825T 18241 . . . . .	37
12	PMMA Altuglas V825T 18242 . . . . .	38
13	Měření ve volném prostředí vs datasheet- tloušťka 1 mm . . . . .	39
14	Měření ve volném prostředí vs datasheet- tloušťka 2 mm . . . . .	40
15	Měření s Konica Minolta CM-5 vs datasheet- tloušťka 1 mm . . . . .	41
16	Měření s Konica Minolta CM-5 vs datasheet- tloušťka 2 mm . . . . .	41
17	T-test pro měření s Konica Minolta CM-5 a datasheetem . . . . .	43
18	T-test pro měření ve volném prostředí a datasheetem . . . . .	43
19	Schéma měření propustnosti prvotní verze . . . . .	47
20	Uchycení měřené tyčinky stojanem . . . . .	47
21	Uchycení měřené tyčinky adaptérem . . . . .	48
22	Distribuce světla na konci tyčinky . . . . .	49
23	Měření spektrální propustnosti pomocí integrační koule . . . . .	50
24	Uchycení tyčinky do integrační koule . . . . .	50
25	Simulace prováděná v programu LightTools . . . . .	51
26	PC Tarflon 1700 . . . . .	52
27	PC Makrolon led 2245 ice blue . . . . .	53
28	PC Lupoy mapa . . . . .	54
29	Případ kdy $M < N$ a $M = N$ . . . . .	55
30	Případ kdy $M > N$ . . . . .	56
31	Teoretické schéma . . . . .	57
32	Schéma zapojení . . . . .	58
33	Pouzdro pro směs luminoforu s PDMS . . . . .	59
34	Nová verze pouzdra pro směs luminoforu s PDMS . . . . .	61
35	Výsledek jednotlivých složek měření . . . . .	61
36	Výsledné ověření teoretického předpokladu . . . . .	62
37	PMMA 8N RED 3V124 . . . . .	67

38	PMMA Altuglas V825T 28226 . . . . .	68
39	PMMA 8N RED 33691 . . . . .	68
40	PMMA Altuglas V825T 18244 . . . . .	69
41	PC Tarflon 1500 . . . . .	69
42	PMMA Altuglas V825T 101 . . . . .	70
43	PC Makrolon LED 2245 clear . . . . .	70
44	PC Lexan XLS 1110 . . . . .	71
45	PC Lupoy . . . . .	71
46	PC Iupilon HL 3303 . . . . .	72

## Seznam tabulek

1	Přehled typu prostředí a odpovídající charakter permitivity . . . . .	15
2	Porovnání simulace s reálným měřením . . . . .	45
3	Skutečné hodnoty světelné trasy v tyčince . . . . .	51
4	Porovnání světelných toků simulace oproti reálnému měření . . . . .	54
5	Pravdivostní tabulka závislosti dvou paprsků . . . . .	57



# 1 Úvod

Firma Varroc Lighting Systems s.r.o. se zabývá výrobou světelné techniky pro automobilový průmysl. Znalost optických vlastností používaných materiálů je pro firmu zásadní. Optické vlastnosti jednotlivých materiálů ve většině případů dodavatelé neuvádí. Tato diplomová práce se zabývá způsoby a následné realizace měření spektrální propustnosti transparentních materiálů. Cílem této diplomové práce je co nejpřesněji změřit spektrální propustnost a následně vyhodnotit její věrohodnost.

Při výrobě světlometů patří transparentní polymery mezi významné prvky, které se vyskytují ve formě světlovodů, barevných filtrů nebo krycích skel. Velký důraz je v této práci na dva nejčastěji se vyskytující polymery při výrobě světlometů. Jedná se o polymethylmethakrylát a polykarbonát, které se zde vyskytují ve dvou různých podobách reprezentující světlovod a barevné filtry.

Další stěžejní část této diplomové práce je zkoumání propustnosti polydimethylsiloxanu s luminoforem. Tato část práce již nespadá pod spolupráci s firmou Varroc Lighting Systems s.r.o., nýbrž se jedná o samostatný celek. Tato diplomová práce popisuje předpoklad a ověření předpokladu spektrální propustnosti PDMS s luminoforem.

Diplomová práce je rozdělena na 3 hlavní úseky. V první teoretické části je popis optických vlastností související se spektrální propustností jako je například lom a odraz světla, Beer-Lambertův zákon, způsob interakce světla s transparentními materiály a také spektroskopie jako celek. V teoretické části je také kladen důraz na popis spektrometru a také na popis transparentních materiálů, které se v této práci vyskytují.

Další hlavní úsek spadá pod praktickou realizaci diplomové práce. Jedná se o měření spektrální propustnosti transparentních materiálů dodané firmou Varroc Lighting Systems s.r.o. Tento hlavní úsek je rozdělen na další dvě podčásti, podle formy materiálu. V této práci jsou tyto dvě podoby materiálu nazývané jako destičky a tyčinky. Pro obě podoby transparentního materiálu jsou uskutečněny a popsány různé metody měření spektrální propustnosti. Dále se zde nachází interpretace výsledků měření spektrální propustnosti a následné ověření korektnosti za pomoci katalogových hodnot a také za pomoci různých simulací.

Poslední významná část je samostatný celek, který se zabývá spektrální propustností luminoforu. Tato část obsahuje teoretický předpoklad, popis způsobu ověření teoretického předpokladu a následně jeho praktické realizace.

## 2 Základní optické vlastnosti

### 2.1 Vlnové a Maxwellovy rovnice

Vlnové rovnice popisují, jakým způsobem se světlo v prostoru šíří. Jelikož světlo není nic jiného než-li elektromagnetické vlnění, elektrická a magnetická složka zde hrají velkou roli. Elektromagnetické pole ve vakuu určují dvě navzájem se ovlivňující vektorové pole, které jsou funkcemi polohy a času, jedná se o elektrické pole  $\vec{E}(r, t)$  a magnetické pole  $\vec{H}(r, t)$ . V materiálovém prostředí se nachází další dvě vektorové pole, to jest elektrická indukce  $\vec{D}(r, t)$  a magnetická indukce  $\vec{B}(r, t)$ . Vztah mezi uvedenými veličinami udávají rovnice[1]

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (1)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} \quad (2)$$

kde  $\varepsilon_0$  je elektrická permitivita vákua,  $\vec{P}$  je hustota elektrické polarizace,  $\vec{M}$  je hustota magnetizace, která je definována jako  $\vec{M} = 0$  v nemagnetických prostředích, a  $\mu_0$  je magnetická permeabilita vákua. Vztah mezi elektrickou indukcí a intenzitou elektrického závisí na elektrických vlastnostech prostředí. Také i vztah mezi magnetickou indukcí a intenzitou magnetického pole závisí na magnetických vlastnostech prostředí. [2][1]

V dielektrických podmínkách jsou vlastnosti prostředí dané ve vztahu mezi  $\vec{P}$  a  $\vec{E}$ . Pokud na prostředí působí pole  $\vec{E}$ , polarizace  $\vec{P}$  je jeho odezvou. Pokud je tento vztah lineární, dielektrické prostředí je nazývané lineárním, v opačném případě je prostředí nazývané nelineárním.

Ve vodivých prostředí se polarizace neuvažuje. Musí se ovšem brát do úvahy existence volných elektrických nábojů, který je charakterizován prostorovou hustotou elektrického proudu  $\vec{J}$  a elektrické vodivosti  $\sigma$ . Pro izotropní materiály platí:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}. \quad (3)$$

Izotropní materiály jsou takové materiály, pro které platí nezávislost vlastností na směru (např. šíření světla, polarizace). Pro anizotropní látky jsou vlastnosti na směru závislé.[2]

Maxwellovy rovnice mají tvar:

$$\nabla \cdot \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (7)$$

Předpokládejme, že se nacházíme v nemagnetických prostředích, tedy  $\mu = \mu_0$ , dále předpokládejme lineární závislost polarizace na elektrickém poli, tedy

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \vec{\chi} \vec{E}, \quad (8)$$

kde  $\vec{\chi}$  je elektrická susceptibilita (tenzor) a odkud je

$$\vec{D} = \varepsilon_0 (1 + \vec{\chi}) \vec{E} = \vec{\varepsilon} \vec{E} \quad (9)$$

Permitivita  $\vec{\varepsilon}$  je tenzorová veličina závislá na prostorových souřadnicích. Výraz  $1 + \vec{\chi}$  definuje relativní permitivitu. Vlastnosti permitivity podle typu prostředí jsou ukázány v následující tabulce.[1]

	homogenní	nehomogenní
izotropní	$\vec{\varepsilon}(\vec{r}) = \varepsilon$	$\vec{\varepsilon}(\vec{r}) = \varepsilon(\vec{r})$
anizotropní	$\vec{\varepsilon}(\vec{r}) = \vec{\varepsilon}$	$\vec{\varepsilon}(\vec{r}) = \vec{\varepsilon}(\vec{r})$

Tabulka 1: Přehled typu prostředí a odpovídající charakter permitivity

## 2.2 Index lomu

Obecně známá rychlost světla  $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  platí pouze ve vakuu. V jakémkoliv jiném prostředí rychlost světla závisí na indexu lomu. Index lomu nám v podstatě říká, o kolik je světlo pomalejší v daném prostředí oproti vakuu. Jedná se tedy o poměr rychlosti světla ve vakuu  $c$  k rychlosti světla o určité vlnové délky v jakékoliv látce. Index lomu je bezrozměrná veličina a značí se písmenem  $n$ . Ve vakuu je rychlost světla pro každou vlnovou délku stejná, v jakémkoliv jiném prostředí tohle ovšem neplatí. Index lomu je funkcí vlnové délky, důsledkem je např. disperze, kde dochází k rozkladu světla vlivem odlišných indexů lomu jednotlivých vlnových délek. Podle definice platí:[1][10]

$$n = \frac{c}{v} \quad (10)$$

Většinou s klesající vlnovou délkou index lomu stoupá. Téměř ve všech optických prostředích platí Cornův vzorec, který udává závislost indexu lomu na vlnové délce

$$n_\lambda = n_0 + \frac{a}{\lambda - \lambda_0} \quad (11)$$

kde  $a$ ,  $n_0$ ,  $\lambda_0$  jsou konstanty.

Pokud světlo přechází z vakua do průhledného prostředí, mení se jeho vlnová délka, protože počet vln opouštějících prostředí se má rovnat počtu vln přicházejících. Z toho vyplývá[10]

$$v_\lambda = v\lambda \quad (12)$$

Je-li vlnová délka ve vakuu  $\lambda$ , platí:

$$v = \frac{v\lambda}{\lambda} = \frac{c}{\lambda_0} \quad (13)$$

a odtud

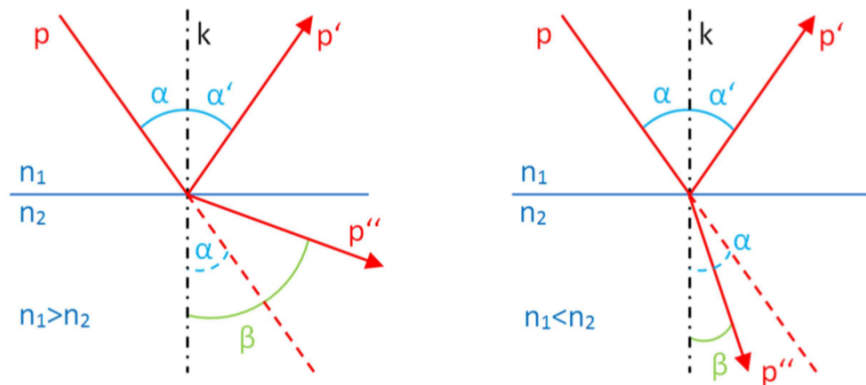
$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (14)$$

## 2.3 Lom a odraz světla

Pro usnadnění definice lomu a odrazu světla se můžeme na světlo dívat jako na paprsek. Podle Fermatova principu se světlo šíří z jednoho bodu do druhého po takové dráze, aby doba k proběhnutí této dráhy nabývala extrémní hodnoty. Extrémem je většinou minimum, tedy že se světlo šíří po nejkratší možné dráze.

Pokud se světlo šíří nehomogenním prostředím, tedy prostředím kde se vyskytují změny indexu lomu, dochází k lomu a odrazu. Lom světla popisuje Snellův zákon:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1} \quad (15)$$



Obrázek 1: Snellův zákon

Podle Snellova zákona lze říci, že při přechodu světla z prostředí s indexem lomu  $n_1$  do prostředí s indexem lomu  $n_2$ , kde platí  $n_1 > n_2$ , dochází k lomu světla od kolmice. V opačném případě, kde  $n_1 < n_2$ , dochází k lomu ke kolmici. Dopadající paprsek a kolmice dopadu tvoří tzv. rovinu dopadu. V případě, kdy rozhraní není rovina, jedná se o kolmici k tečné rovině v místě dopadu.[10]

Pro odraz světla platí jednoduchá rovnice:

$$\alpha = \alpha' \quad (16)$$

Tato rovnice nám říká, že pokud paprsek dopadá na rozhraní pod úhlem dopadu  $\alpha$ , který svírá s kolmicí  $k$ , odražený paprsek bude mít úhel odrazu  $\alpha'$ . Tyto úhly se tedy rovnají.[10]

Odraz a lom nenastávají vždy současně. Za určitých podmínek dochází k totálnímu odrazu. Aby došlo k totálnímu odrazu, je zapotřebí splňovat dvě podmínky. První podmínkou je, aby světlo dopadalo z opticky hustšího prostředí do opticky řidšího prostředí. Druhou podmínkou je dopad pod úhlem větším než je mezní úhel dopadu  $\alpha_m$ . Mezní úhel dopadu je speciální případ, kde úhel lomu  $\beta = 90^\circ$ . [10]

## 2.4 Beer-Lambertův zákon

Absorpce záření materiálem je dán Beer-Lambertovým zákonem:

$$\log_{10} \frac{I_0}{I} = \epsilon c l \quad (17)$$

Kde:

- $I_0$  = intenzita světla před vstupem do materiálu
- $I$  = intenzita světla vystupující z materiálu
- $\epsilon$  = absorpční koeficient
- $c$  = koncentrace absorpční složky
- $l$  = délka dráhy světla v materiálu

Beer-Lambertův zákon implikuje, že koncentrace i druh molekul jsou velmi důležité v procesu absorpce světla. V tomto zákoně není žádná informace o vlastnostech záření. Také se nebere v úvahu vlastnosti materiálu nebo úhel záření vstupujícího do látky, což dohromady dává informaci ohledně energie záření. Beer-Lambertův zákon je ovšem účinný nástroj na výpočet spektroskopických veličin, jako je koncentrace absorpční složky nebo absorpční koeficient.[3]

Planckův zákon uvádí, že energie může být vyzařována pouze v diskrétních energetických úrovních.

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (18)$$

Kde  $\lambda$  je vlnová délka záření,  $h$  je Planckova konstanta a  $p$  je hybnost. Každý foton s energií  $h\nu$  se pohybuje jako částice nebo jako vlna. Znamená to tedy, že ke každému elektromagnetickému vlnění lze přiřadit určité částicové vlastnosti a ke každé částici se zase může projevovat jako vlnění. Mezi částicovým a vlnovým pohledem na záření není ovšem žádný rozpor.[3]

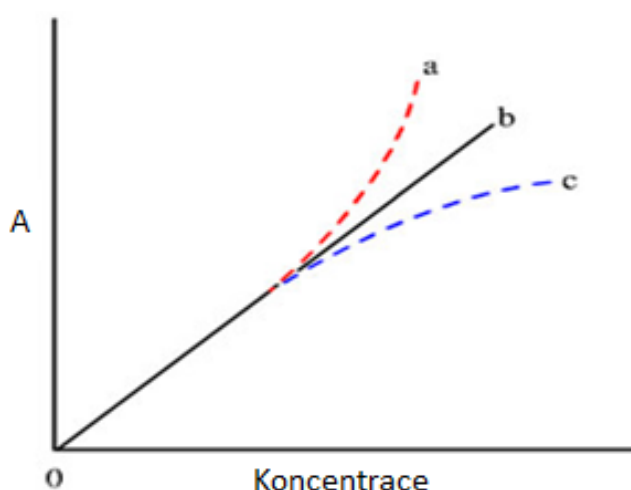
Když elektron přechází z vyššího energetického stavu do nižšího, velikost vyzářené energie je dán vztahem:

$$E_i - E_f = h\nu \quad (19)$$

kde  $E_i$  je vyšší energetický stav,  $E_f$  je nižší energetický stav,  $h$  je Planckova konstanta a  $\nu$  je vlnová délka emise.

Pro absorpci platí stejný vztah. Procesy absorpce a emise si jsou velmi podobné. V případě absorpce foton vybudí elektron v nižším energetickém stavu do vyššího energetického stavu a rozdíl mezi těmito stavy je právě dán energií fotonu. V případě emise je energie fotonu, a tedy i jeho vlnová délka, dána rozdílem těchto energetických stavů. Jak záření putuje v materiálu, proces absorpce postupně snižuje intenzitu elektromagnetického vlnění a současně se tím zvyšuje absorbovaná energie dané látky. Opačný proces, kde se excitované elektrony vrací zpět do svého původního energetického stavu a svou energii vydají ve formě elektromagnetického záření, se nazývá samovolná emise.[3]

Z Beer-Lambertova zákona vychází, že mezi koncentrací složky a absorpcí je úzká souvislost. Graf závislosti koncentrace a absorpce by měl být lineární s počátkem v nule. Tohle ovšem v praxi není až taková pravda a existují určité limitace. Pro vysoké koncentrace se lineární průběh může změnit na zakřivit. Podle druhu křivky se nazývají jednotlivé průběhy. Podle obrázku 1. je případ (a) známý jako pozitivní odchylka a případ (c) jako negativní odchylka. Jako příčina těchto odchylek může být přítomnost elektrolytů, které se při vyšší koncentraci chovají jinak, a nebo také vyšší koncentrací vodíkových kationtů.[7]



Obrázek 2: Závislost koncentrace složky na absorpci [7]

## 2.5 Interakce světla s transparentními materiály

Materiál se jeví transparentně, pokud světlo ním projde nezměněné. Materiál je transparentní pokud tedy neexistuje žádný jev, který by transparentnosti zabránil, buďto absorbováním nebo rozptýlením světla. Materiál, který se jeví homogenně pro lidské oko, se ve skutečnosti skládá z miniaturních krystalů. Pokud je vzdálenost mezi těmito krystaly menší než je vlnová délka

procházejícího světla, tak světlo projde bez jakéhokoliv rozptylu. Index lomu takové látky je uniformní, a proto je látka transparentní. V opačném případě, kde vzdálenost mezi krystaly je větší než vlnová délka procházejícího světla, je látka buďto neprůhledná nebo částečně průsvitná. Například sklo vzniká rychlým ochlazením taveniny a nestačí si tak vytvořit krystalickou mřížku. Důsledkem toho je sklo homogenní, amorfní, a proto i transparentní. [14]

Struktura látky udává, jestli je látka transparentní, průsvitná nebo neprůhledná. Průhledné materiály jsou tvořeny z amorfních látek, tedy látek, které nemají pevnou krystalickou strukturu. Například amorfní polymery bez žádných aditiv jsou většinou transparentní. Polymery, které mají semikrystalickou strukturu, propouští světlo částečně a velmi rozptýleně, jeví se proto průsvitně. [14]

## 2.6 Spektroskopie

Spektroskopie je kvantitativní měření optických vlastností materiálů přes široký obsah vlnových délek zahrnující UV záření, viditelné a IR záření. Tyto spektrální měření zahrnují reflektanci, transmitanci, absorbanci, rozptyl a luminiscence. Spektroskopie je značně využívaná metoda používaná napříč vědeckými obory jako je např. chemie, biologie, biomedicína, fyzika. Jako příklad jednoho z mnoha využití spektroskopie je měření absorpce a fluorescence za účelem zjištění koncentrace látek ve farmacii. Podle druhu záření se může spektroskopie dělit na dva druhy:[4][5]

- **UV-viditelná spektroskopie:** využívá UV (148-400 nm) a viditelného elektromagnetického záření (400-700 nm)
- **IR spektroskopie:** využívá IR elektromagnetického záření (700-15000 nm)

V případě viditelné spektroskopie můžeme použít pro hrubý odhad i náš zrak. Například látka, která absorbuje celé viditelné spektrum, se jeví černě. V opačném případě, kdy látkou prochází celé viditelné spektrum, se bude měřený materiál jevit bíle nebo transparentně. Pokud látka absorbuje červené světlo(700 nm), bude se jevit zeleně.[4][5]

### 2.6.1 Absorbance, transmittance a reflektance

Množství světla, které prošlo měřeným materiálem se nazývá transmittance( $T$ ). Transmittancí je označován poměr intenzity záření( $I$ ), které vychází z měřené látky, vůči intenzitě záření v referenčním měření( $I_0$ ). Transmittance referenčního měření je definován jako 100%T. Referenční měření je v podstatě měření s absencí měřené látky. transmittance je tedy definována jako:[6]

$$T = \frac{I_0}{I} \quad (20)$$

Pro procentuální vyjádření se hodnota T vynásobuje 100, získáme tím tedy %T.

Absorbance se na průchod světla materiálem dívá z opačného pohledu. Jedná se o vyjádření, kolik záření bylo látkou absorbováno. Absorbance je logaritmicky příbuzná transmitanci a jednoduše z ní vychází. Je definována jako:

$$A = \log_{10} \frac{1}{T} \quad (21)$$

nebo

$$A = 2 - \log_{10} \%T \quad (22)$$

Pokud světlo projde látkou bez žádné absorpce, poté absorbance je nulová a transmitance je 100%. Na druhou stranu, pokud je světlo plně materiálem absorbováno, poté je %T nulové a absorbance je nekonečná. Ze vztahu lze také říci, že pokud transmitance exponenciálně s tloušťkou materiálu klesá, poté absorbance lineárně stoupá.[6]

Reflektance je definována jako poměr světla, které na objekt dopadlo, vůči odraženému světlu. Pokud se jedná o netransparentní materiál, světlo se odráží pouze na povrchu materiálu. Podle hrubosti povrchu můžeme mít přímý odraz a difúzní odraz. Toho se využívá např. v automobilovém průmyslu, kde můžeme určovat míru rozptylu odrazu na jednotlivých částí světlometu podle zdrsnění nebo leštění materiálu. Přímý odraz se řídí podle zákona odrazivosti, tudíž že úhel odrazu se rovná úhlu dopadu. I u transparentních materiálů dochází k odrazům. Když záření dopadá na transparentní materiál, část světla se láme do materiálu a část je odražena zpět (pokud ovšem nedochází k úplnému odrazu). Jedná se o Fresnelovy odrazy a vyskytující se na každém rozhraní dvou transparentních materiálů o různých indexech lomu. Pokud záření dopadá kolmo na rozhraní, pro Fresnelův odraz platí:[6]

$$R = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (23)$$

Kde R je míra odrazu a  $n_1, n_2$  jsou indexy lomu prostředí.

## 2.7 Luminiscence

Luminiscence je samovolná emise záření tělesa nad rámec svého tepelného záření. Luminiscenční záření nastává poté, co těleso absorbovalo energii ze světelného záření, elektronů apod. Absorbací dochází k excitaci atomu a následným návratem elektronů do základního stavu dojde k vyzáření fotonů. Pro luminiscenci také platí, že záření o kratší vlnové délce vyvolá záření fotonů o delší vlnové délce a tudíž i nižší energii.[8]

Luminiscence se dělí na:

- fluorescence
- fosforescence



### 2.7.1 Fluorescence

Fluorescence je fyzikální jev, při kterém určité látky (fluorofory) emitují světlo o určité vlnové délce  $\lambda_{emit}$  krátce poté, co jí ozářilo světlo jiné vlnové délky  $\lambda_{excit}$ . Musí platit  $\lambda_{emit} > \lambda_{excit}$ . Jelikož má emitující světlo větší vlnovou délku než-li ozařující světlo, má i nižší energii. Tato ztráta energie je způsobena vibrační relaxací a rozdíl energií absorbovaných a emitujících fotonů je popsán stokesovým posuvem. Pro fluorescenci je specifická doba dohasínání, kde po skončení buzení emitující světlo prakticky ihned vymizí (obvykle řádově  $10^{-8}$  s). Fluorescence se stala základem fluorescenční mikroskopie, která se např. využívá v medicíně a biotechnologii. Jako jeden z příkladů je porovnávání pozic molekul v buňce. Pokud na jednu látku navážeme rhodamine (emituje zelené světlo po ozáření modrým světlem) a na druhou fluorescein (emituje červené světlo po ozáření zeleným světlem), můžeme poté porovnávat vzájemné pozice. Při návratu elektronu z excitovaného stavu zpět do základního stavu nemusí vždy docházet k emisi fotonu. Mimo jiné může dojít i k rezonančnímu přenosu energie (FRET), kde se energie nezářivě přeneseme mezi dvěma molekulami. Toho se využívá např. při studiu interakce proteinů. [8][9]

Charakteristiky fluorescence:

- **Intenzita**- počet fotonů procházející v daném směru jednotkovou plochou za jednotku času
- **Polarizace**- druh polarizace emitujícího světla
- **Spektrální složení**- spektrální hustota fotonového toku na jednotkový interval vlnových délek nebo frekvencí
- **Doba dohasínání**- je daná dobou života excitovaného stavu, z něhož dochází k emisi
- **Koherenční vlastnosti**- vztah mezi fázemi emitujícího světla

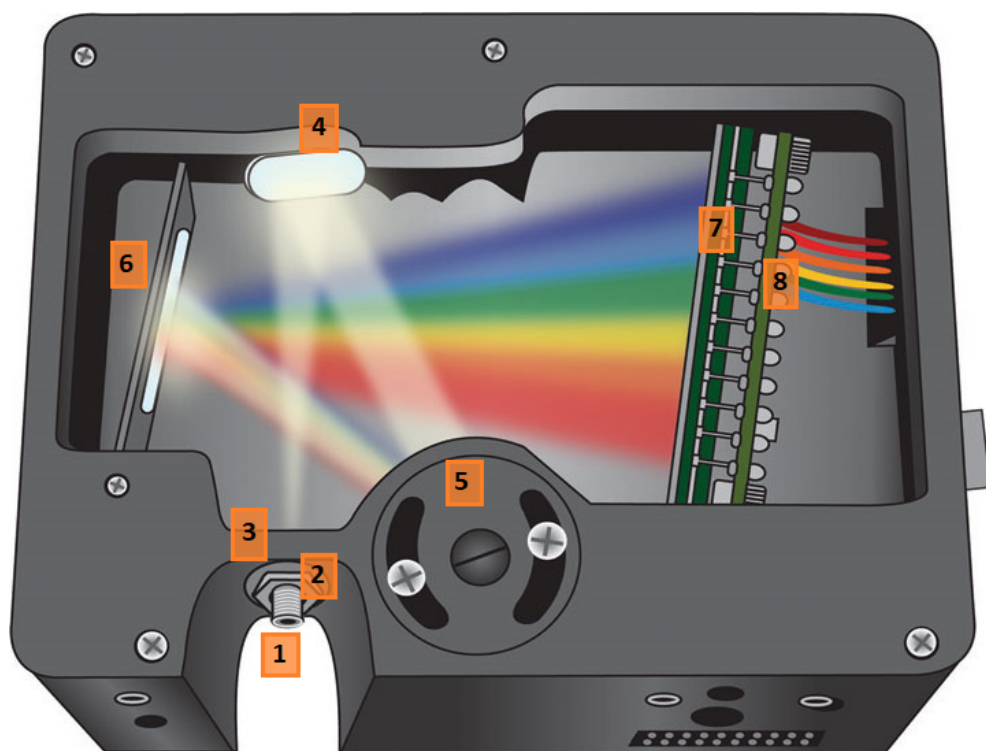
Typickými fluorofory jsou např. chinin, fluorescein nebo rhodamin.[8]

### 2.7.2 Fosforescence

Fosforescence se liší od fluorescence dobou dohasínání, která je mnohem delší než u fluorescence ( $> 10^{-8}$ ), řádově i několik minut. To je způsobeno existencí metastabilní hladiny, kde elektrony setrvávají do té doby, než vyzáří energii, která je v této hladině udržovala. Fosforeskující materiály dokáží pojmout i UV záření s větší energií. Excitované elektrony se tímto dostávají do vyšší energetické hladiny a trvá déle, než veškerou energii vyzáří.[8]

### 3 Spektrometr

Hlavní funkcí spektrometru je přijmout světlo, rozdělit jej na základní spektrální komponenty, digitalizovat tento signál jako funkci vlnové délky a přenést výstup do počítače. První krok tohoto procesu je navést světlo optickým vláknem do úzkého otvoru, neboli štěrby. Poté ve většině spektrometrů je světlo uvnitř kolimováno konkávním zrcadlem a nasměrováno na difrakční mřížku. Zkolimované světlo je poté rozloženo difrakční mřížkou na jednotlivé spektrální složky. Každá spektrální složka je vyzařována z difrakční mřížky pod jiným úhlem. Druhým konkávním zrcadlem je světlo znovu zkolimováno a navedeno na detektor. Detektor provede konverzi z fotonů na elektrony, které jsou zdigitalizovány a převedeny USB nebo sériovým portem do PC. [22]



Obrázek 3: Spektrometr

Komponenty podle obrázku č. 3:

1. Konektor pro vlákno
2. Štěrbina
3. Optický filtr
4. Kolimační zrcadlo
5. Difrakční mřížka

6. Fokusuující zrcadlo
7. Fokusuující válcová čočka
8. Detektor

### 3.1 Štěrbina

Štěrbina je zásadní součást spektrometru, která určuje optické rozlišení a propustnost. Světlo z optického vlákna se dostává do spektrometru právě přes šterbinu, ta propouští světlo pouze pod určitým úhlem.

Šířka šterbiny je většinou v rozsahu od  $5\mu m$  až do  $800\mu m$ , zatímco výška je v rozmezí od  $1mm$  až  $2mm$ . Kvůli svým malým rozměrům, musí být šterbina zakomponována do spektrometru velice pečlivě, v opačném případě můžeme ztratit značné množství optického výkonu nebo zhoršit celkovou kalibraci systému.[11]

Šterbina udává kolik procent optického výkonu bude blokovat svým rozměrem, tudíž nám říká jakou optickou propustnost bude mít systém. Čím méně optického výkonu má spektrometr k dispozici, tím déle musí sbírat dostatečný výkon pro přesné měření. Pro větší propustnost se může použít speciální optické vlákno, které má konektor ve tvaru šterbiny. Je logické, že čím větší rozměr šterbiny, tím větší optická propustnost, ovšem na úkor rozlišení.[11]

Primární funkcí šterbiny je kontrola rozlišení spektrometru. Jakmile se šířka otvoru zmenšuje, tím více je blokováno světlo, které je ve větším úhlu vůči optické ose. Propouštěné paprsky jsou vysoce paraxiální, a tím se redukuje zkreslení obrazu na detektoru.[11]

Zrcadla před detektorem a před difrakční mřížkou mají určitou hodnotu zvětšení  $M$ , která udává finální šířku obrazu  $W_i$  podle vzorce:

$$W_i = (M^2 \cdot W_s^2 + W_o^2)^{1/2} \quad (24)$$

Kde  $W_s$  je šířka šterbiny a  $W_o$  je další rozšíření obrazu, které se liší podle použitého druhu spektrometru. Rozlišení spektrometru je tedy dán podle relativní velikosti  $W_i$  a také podle vzdálenosti  $d\lambda$  mezi jednotlivými vlnovými délkami po průchodu difrakční mřížkou. Pokud je  $W_i$  příliš velké pro určité  $d\lambda$ , může dojít k přesahu obrazů jednotlivých vlnových délek. Tohle způsobí neurčitost, který bod v prostoru odpovídá jaké vlnové délce, a tím snižuje schopnost spektrometru mezi sebou rozeznat sobě blízké vlnové délky. Tento problém se může vyřešit zvětšením vzdálenosti  $d\lambda$ , ovšem takové řešení ve výsledku snižuje celkový rozsah vlnových délek, které spektrometr dokáže měřit. Dalším možným řešením je zúžení šterbiny. Pokud je  $W_i$  blízko nebo menší než  $d\lambda$ , dokáže spektrometr rozeznat sobě blízké vlnové délky. [11]

### 3.2 Difrakční mřížka

Difrakční mřížka určuje spektrální rozsah a částečně i rozlišení spektrometru. Existují dva druhy difrakčních mřížek. Prvním z nich je rytá difrakční mřížka, která je vyrobena vyleptáním pa-

ralelních drážek na substrát a následným potažením vysoce odrazivého materiálu. Druhý druh difrakční mřížky je tzv. holografická difrakční mřížka. Interferováním dvou UV paprsků vzniká ve speciálním optickém skle variabilní sinusový index lomu. Holografická difrakční mřížka má více spojitě a jednotné spektrum, ale mnohem menší celkovou účinnost. Ačkoliv jsou ryté mřížky nejjednodušší a nejlevnější typ difrakční mřížky, nemají tak dokonale spojitě spektrum, kvůli malým nedokonalostem při výrobě. Holografické difrakční mřížky se také dají nanést na konkávní plochy. To jim umožňuje fungovat jako disperzní a fokusující prvek najednou.[13]

Rozsah disperze je dán počtem drážek na  $mm$  mřížky. Tato drážková frekvence určuje spektrální rozsah spektrometru a také má vliv na spektrální rozlišení. Čím větší je rozsah disperze, tím větší je rozlišovací schopnost spektrometru. Naopak, čím menší je drážková frekvence, tím menší je rozsah disperze a tudíž i větší spektrální pokrytí za cenu horšího spektrálního rozlišení. [13] Úhlová disperze difrakční mřížky je popsána následující rovnicí:

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{10^6 \cdot d \cdot \cos\beta} \quad (25)$$

Kde  $\beta$  je difrakční úhel,  $d$  je velikost jednotlivých drážek,  $m$  je difrakční řád a  $\lambda$  je vlnová délka. Spektrální rozsah spektrometru ( $\lambda_{max} - \lambda_{min}$ ) se může vypočítat s pomocí šířky detektoru ( $L_d$ ), který se skládá z pixelů ( $n$ ) o určité šířce ( $W_p$ ), tudíž platí  $L_d = n \cdot W_p$ . Pro spektrální šířku spektrometru platí:[13]

$$(\lambda_{max} - \lambda_{min}) = L_d \frac{10^6 \cdot d \cdot \cos\beta}{mF} \quad (26)$$

kde  $F$  je ohnisková vzdálenosti fokusujícího zrcadla.

Minimální hodnota vlnové délky, která může být od sebe difrakční mřížkou rozlišena, je dána vztahem:

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{d}{m \cdot L_g} = \frac{1}{m \cdot N} \quad (27)$$

Kde  $N$  je celkový počet drážek v difrakční mřížce. Rozlišovací schopnost difrakční mřížky je většinou mnohem lepší než spektrometru. Nejdelší možná vlnová délka, které bude rozložena difrakční mřížkou, je rovna  $2d$ , tím je dán i horní limit difrakční mřížky.[13]

### 3.3 Detektor

V každém spektrometru je finálním elementem v nějaké formě fotodetektor. Fotodetektor absorbuje optickou energii a konvertuje ji na elektrickou, ve formě elektrického proudu nebo ve formě náboje, který je poté přiveden na výstupní obvod (CCD). Existuje několik metod jak lze analyzovat rozložený optický signál z difrakční mřížky.[12]

Metoda rotující difrakční mřížky používá pouze jeden malý fotodetektor. Jak už název vypovídá, v tomto systému existuje rotující difrakční mřížka. Fotodetektor snímá v jeden čas pouze určitou vlnovou délku. Jak difrakční mřížka rotuje, postupně se vykresluje závislost optické in-

tenzity na vlnové délce. Prvky, které zpracovávají signál vědí, která vlnová délka odpovídá které úhlové pozici difrakční mřížky. [12]

Metoda řady fotodetektorů používá pole obyčejných fotodetektorů. zde může být jedna ale i více řad fotodetektorů. Každý sloupec z řady zachycuje určitý malý rozsah vlnové délky z difrakční mřížky. Elektronické součástky poté překládají elektrický signál z každého sloupce jako výkon související s daným rozsahem vlnové délky. [12]

DLP metoda využívá jeden fotodetektor s velkou přijímací plochou. Tato metoda využívá DMD, neboli pole digitálně ovládaných miniaturních zrcadel. Optický signál z difrakční mřížky dopadá právě na DMD systém, který odráží na fotodetektor pouze určitý rozsah vlnové délky v jeden čas. Elektronické součástky přiřadí elektrický signál z fotodetektoru k určité vlnové délce podle aktivních prvků v DMD.[12]

Jeden z nejdůležitějších parametrů fotodetektorů je spektrální rozsah, neboli u jakých vlnových délek detektor produkuje elektrický signál po dopadnutí optického signálu. Spektrometr typicky používá polovodičové fotodiody, buďto na bázi křemíku (Si) nebo InGaAs. Šířka zakázaného pásma polovodiče  $E_g$  udává minimální potřebnou energii, kterou elektron potřebuje absorbovat ze světelné energie, aby mohl opustit valenční pásmo. Následující vztah nám tedy udává maximální možnou vlnovou délku, kterou dokáže polovodič absorbovat.[12]

$$\lambda_{max} = \frac{hc}{qE_g} \quad (28)$$

Kde  $h$  je Plankova konstanta,  $c$  je rychlost světla ve vakuu,  $q = 1,602J/eV$ . Fotodetektor na bázi křemíku má velikost zakázaného pásma  $E_g = 1,11eV$ , což koresponduje s maximální možnou vlnovou délkou  $\lambda = 1117nm$ . Proto se fotodetektory na bázi křemíku používají hlavně pro spektroskopii viditelného světla. Slitiny InGaAs jsou konstruovány smícháním InAs a GaAs v různých poměrech. Výsledné zakázané pásmo InGaAs fotodetektoru se pohybuje v rozmezí  $E_g = 0,36eV$  až  $E_g = 1,43eV$ , v závislosti na poměru výsledné slitiny. Tomu odpovídá maximální vlnová délka v rozmezí  $870nm$  až  $3440nm$ . [12]

Posuzování minimální možné vlnové délky, kterou zvládne fotodetektor absorbovat, je mnohem obtížnější. Spodní limit fotodetektoru závisí nejvíce na absorbční charakteristice polovodiče a ta se velmi mění s tloušťkou fotodetektoru. Možnost, jak snížit spodní detekční limit fotodetektoru, je pomocí fluorescenční vrstvy na vstupu fotodetektoru. Fluorescenční vrstva absorbuje fotony s vyšší energií a emituje fotony s nižší energií, které jsou již fotodetektoem detekovatelné.[12]

## 4 Transparentní materiály

### 4.1 PC

Polykarbonát je transparentní amorfni termoplast. Má výborné mechanické vlastnosti, dokáže si udržet pevnost až do  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Charakteristiky PC jsou podobné jako PMMA s tím rozdílem, že PC je odolnější, použitelný ve větším teplotním rozsahu, ale zato dražší než PMMA. Hlavní charakteristiky PC materiálů:[15]

- Odolnost a houževnatost materiálu
- Optická propustnost
- Lehká váha
- Absorpce UV záření
- Chemická odolnost
- Tepelná odolnost

Polykarbonát má vysokou spektrální propustnost, která se podobá sklu. Stejně jako sklo může být PC vyrobeno tak, aby kompletně blokovalo UV záření a fungovalo tedy jako UV filtr. Díky amorfni struktuře má ideální optické vlastnosti, jeho index lomu je  $n = 1,584$ . PC materiál má také vysokou tepelnou odolnost, je termálně stabilní až do  $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Nevýhodou PC materiálu je žloutnutí materiálu po delším vystavení UV zářením.[15]

Polykarbonát je velmi užitečný plast, který se využívá v oblastech, kde je potřeba transparentního a odolného materiálu. PC je v podstatě lehčí varianta skla a navíc s přirozeným UV filtrem, proto se také často používá pro ochranné brýle. PC se dnes vyskytuje na mnoha místech přes kuchyňské spotřebiče, automobily, CD/DVD, obaly pro jídlo až po medicínu, elektroniku a stavitelství.[15]

### 4.2 PMMA

Polymethylmetakrylát neboli akrylát nebo akrylátové sklo je transparentní tuhý termoplast. Výhody PMMA oproti jiným transparentním polymerům jsou vysoká odolnost vůči UV záření, excelentní světelná propustnost, neomezené možnosti zbarvení. PMMA polymer má vlastnosti podobné sklu s tím rozdílem, že je o polovinu lehčí a desetkrát odolnější vůči nárazům, také je více robustní a méně náchylná na poškození.[16]

Index lomu akrylátu je 1,49. Mezi velké výhody PMMA patří jeho vysoká optická propustnost a jednoduché tepelné tváření bez jakékoliv ztráty optické čirosti. Také je velmi odolný a přitom lehký termoplast. Hustota PMMA je 1,17 až 1,20 g/cm<sup>3</sup>, což je zhruba o polovinu méně než v případě skla. Také je odolný vůči vlhkosti a vodě, jelikož vykazuje téměř nulovou schopnost ji

absorbovat. Oproti PC vykazuje větší odolnost vůči povrchovým škrábancům, nicméně menší oproti sklu. Akrylát má vysokou rezistanci na UV záření. Většina akrylátových polymerů jsou UV stabilizovány, aby dlouhé působení UV záření nemělo žádný vliv na materiál. Tímto jsou ideálním materiálem pro venkovní aplikace. [16]

V porovnání s PC je PMMA levnější, ovšem méně odolnější materiál vůči nárazové síle. Velká výhoda PMMA oproti PC je ve větší odolnosti vůči škrábancům a také v zachování si optických vlastností po čase, kde PC materiál po čase může žloutnout. PMMA je výborná volba pro optické přístroje. V případě rozbití poškozuje méně lidskou tkáň nežli PC. Často se využívá směsi PC/PMMA, kde se může skloubit excelentní optické vlastnosti PMMA s tvrdostí PC. Díky své odolnosti vůči UV záření je akrylát ideální pro venkovní aplikace. Jako ideální příklad využití by mohl být skleník, jelikož akrylát také dobře izoluje teplo. Další využití má PMMA v automobilovém průmyslu, kde se používá pro výrobu čelních skel, panelů v interiéru a také je nejčastější materiál jako kryt zadních světel. Dále se PMMA používá jako displej pro elektroniku, najdeme jej tedy v LCD/LED obrazovkách a telefonech. Akrylát je zdravotně nezávadný, lehce omyvatelný materiál, a proto má široké uplatnění i ve zdravotnictví.[16]

### 4.3 PDMS

Polydimetylsiloxan, často označován jako silikonový kaučuk, je polymerní organokřemičitá sloučenina, obsahující v jedné molekule vazbu Si-O. PDMS je měkký materiál, který si zachovává svou vlastnosti při širokém rozsahu teplot, dokáže odolat teplotám až 350 °C. [17] PDMS je transparentní materiál bez zápachu a chuti. Také je viskoelastický, což znamená, že při dlouhých časových úsecích se chová jako viskózní kapalina podobná medu, nicméně v krátkých dobách průtoku nebo nízkých teplotách působí jako elastická pevná látka. Má vysokou odolnost vůči UV záření, radiaci, teplotním změnám a chemikáliím. Je také opticky čistý materiál, obsahující jen velmi malou míru nečistot, a tím pádem je nevhodným prostředím pro bakterie. Hlavní nevýhodou PDMS je nákladná a složitá výroba.[17] PDMS má široké spektrum využití, např. v letectví, lékařství, potravinářství, elektronice a automobilovém průmyslu. Konkrétní aplikace PDMS jsou např. čočky, prostředky proti pění, těsnění a maziva.[17]

## 5 Metodika měření

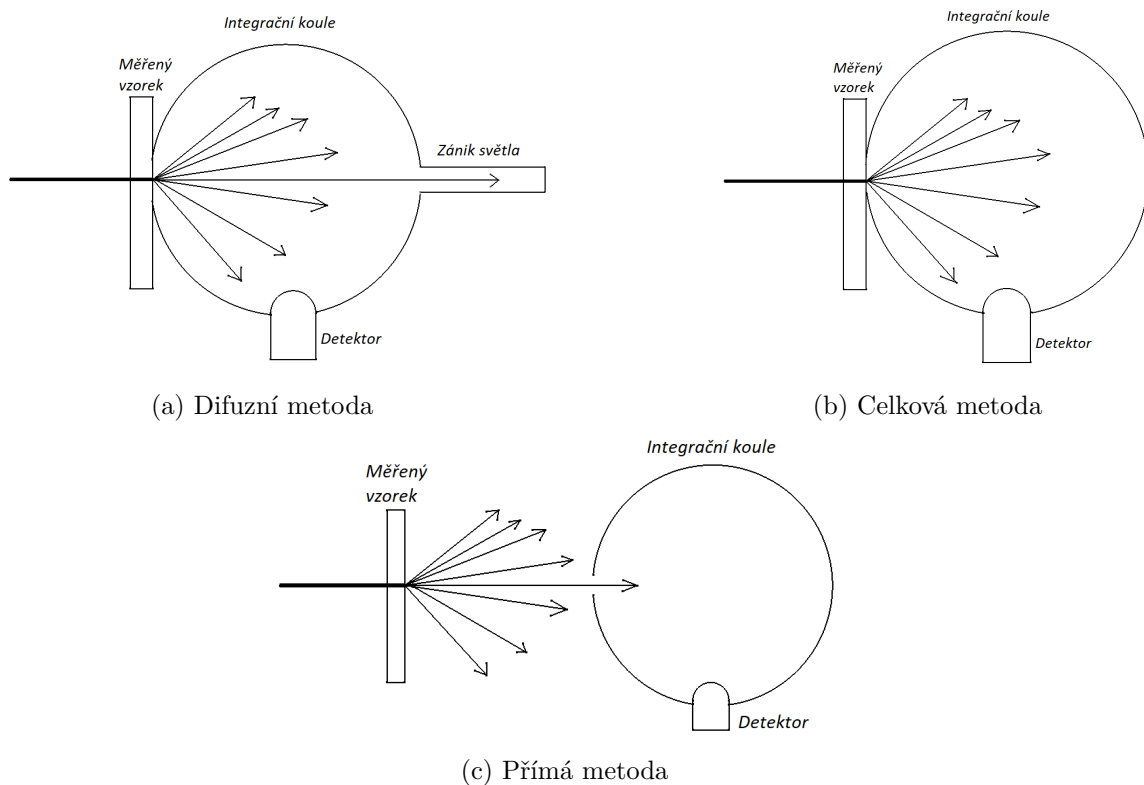
### 5.1 Způsoby měření spektrální propustnosti využívané v automotive

S ohledem na druh materiálu se liší i způsoby měření spektrální propustnosti. Tyto různé způsoby měření spektrální propustnosti zahrnují přímou, difuzní a celkovou metodu. Přímá metoda spočívá v detekci světla vystupujícího z materiálu ve stejném úhlu jako dopadající světlo na materiál. Difuzní metoda detekuje veškeré světlo vystupující z materiálu mimo světlo se stejným úhlem jakým je úhel dopadajícího světla na materiál. Jinak řečeno difuzní metoda zkoumá veškeré světlo, které bylo materiálem rozptýleno. Celková metoda je kombinací dvou předešlých, detekuje veškeré světlo, které materiálem prochází.[19][20][21]

Obecně pro měření spektrální propustnosti platí, že se porovnává intenzita vystupující z měřené látky oproti referenčnímu měření s absencí měřené látky. K realizaci popsaného principu stačí kolimovaný paprsek, detektor a měřený vzorek. Po zaznamenání reference bez měřeného vzorku se do světelné trasy vloží vzorek a získá se relativní propustnost vůči referenci. Tato realizace je vhodná pro materiály, které nemění světelnou trasu paprsku nebo u kterého nedochází k žádnému rozptylu. Pro takový druh materiálu se často používá i spektrofotometr. Ve spektrofotometru se nachází zdroj záření, monochromátor, prostor pro měřený vzorek, detektor a vyhodnocovací zařízení. Díky tomuto přístroji lze získat jednoduchým a přesným způsobem hodnoty propustnosti.[19][20][21]

V automotive se často používají materiály s určitou povrchovou drsností. Tato povrchová drsnost se chemicky nanáší i na transparentní materiály za účelem zvýšeného rozptylu. Čím větší je tato uměle přidaná drsnost, tím větší je i rozptyl daného povrchu. V automotive se transparentní materiály s drsností na povrchu používají hlavně ve světlometech, kde jejich funkce je co nejvíce rozptýlit procházející světlo a tím homogenizovat výstup ze světlometu. Pro realizaci měření spektrální propustnosti těchto materiálů je zapotřebí již důmyslnějších prostředků. Nejčastěji se využívá integrační koule v různých stylech provedení. Tyto různé druhy provedení jsou znázorněny na obrázku číslo 4.[19][20][21]





Obrázek 4: Využití integrační koule pro měření spektrální propustnosti [21]

## 5.2 Metodika měření praktické části

Při měření spektrální propustnosti obecně platí, že se porovnává intenzita záření vystupující z měřené látky vůči referenčnímu měření s absencí měřené látky. Z toho vyplývá i následující vzorec, kde  $I_0$  je intenzita referenčního měření,  $I$  je intenzita měření s vloženou látkou a  $T$  je celková transmitance:

$$T = \frac{I_0}{I} \quad (29)$$

Stejná úvaha se bere v potaz i v této diplomové práci. Zde jsou měřené materiály ve formě pevných transparentních polymerů. I zde se tedy provádělo referenční měření bez měřené látky a poté měření spektrální propustnosti s měřenou látkou relativně vůči referenci. Pro korektní výsledky by mělo platit, že intenzita na výstupu  $I$  při měření s danou látkou, by měla být menší oproti intenzitě referenčního měření  $I_0$ , právě o intenzitu ztracenou v měřené látce.

V případě měření propustnosti tuhých polymerů zde nastává problém. Jelikož při měření propustnosti se světelná energie ztratí ve formě absorpce v samotném polymeru, tak i ve formě Fresnelových odrazů na rozhraní. Je tedy potřeba zanedbat odrazy na rozhraní. Naskytují se zde dva způsoby jak by se dalo přistupovat k tomuto problému:

1. Eliminace Fresnelových odrazů při samotném měření

## 2. Korekce naměřených dat odlitrováním vlivu odrazů

Pokud je index lomu okolního prostředí stejný jako v samotné látce, světlo projde bez jakéhokoliv odrazu. Tohle je jediný způsob jak by se dalo Fresnelových odrazů zamezit. V referenčním měření by se tedy nacházelo prostředí, které má stejný index lomu jako měřená látka. Do tohoto prostředí by se poté při samotném měření daná látka vložila, nevznikly by žádné Fresnelovy odrazy a měření by bylo přesné. Je ovšem velmi obtížné takové prostředí s identickým indexem lomu vytvořit. V úvahu tedy přichází pouze druhý způsob, a tím je úprava naměřených dat.

Pokud je úhel záření vůči tečné rovině v místě dopadu záření  $90^\circ$ , můžeme velikost odrazu vypočítat pomocí vztahu:

$$R = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (30)$$

Kde figurují hlavně index lomu okolního prostředí a index lomu v tomto případě polymeru. Teoreticky by se mohl vliv odrazu vypočítat a od měření následně odečíst. K tomu by bylo zapotřebí znát index lomu měřeného polymeru. Index lomu je funkcí vlnové délky. Bylo by tedy nutné znát hodnotu indexu lomu pro každou vlnovou délku. Ovšem dodavatelé polymerů pro firmu Varroc Lighting Systems s.r.o. tuhle informaci neuvádí. Byla známá pouze hodnota efektivního indexu lomu.

Vliv Fresnelových odrazů se nakonec vyřešil použitím dvou rozdílných velikostí materiálu.

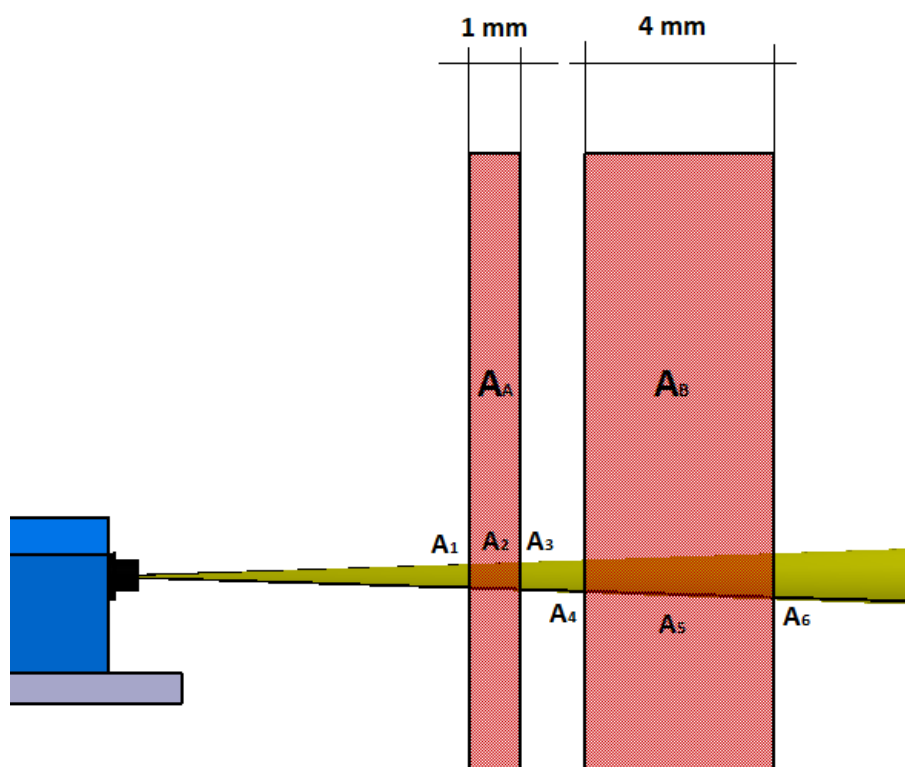
### 5.3 Měření spektrální propustnosti bez Fresnelových odrazů

Tato kapitola popisuje proces měření a zpracování výsledků tím způsobem, aby byly Fresnelovy odrazy zanedbány. Pro odfiltrování Fresnelových odrazů z měření spektrální propustnosti je vždy využito dvou rozdílných velikostí materiálu. Pro lepší vizualizaci slouží obrázek 5, kde jsou znázorněny transparentní materiály o tloušťce 1 mm a 4 mm.  $A_1$ ,  $A_3$ ,  $A_4$ ,  $A_6$  znázorňují útlum způsobený odrazy na rozhraní.  $A_2$  a  $A_5$  jsou útlumy způsobené samotným materiálem. Pokud se provede měření absorpance nejprve s materiálem o tloušťce 1 mm a poté měření absorpance s materiálem o tloušťce 4 mm, hodnota útlumu na rozhraních bude pro obě měření stejná. Jediné v čem se tyto dvě měření budou lišit, jsou hodnoty útlumu v samotném materiálu, tedy hodnoty  $A_2$  a  $A_5$ . Pokud se odečte souhrnná absorpance  $A_A$  od absorpance  $A_B$ , dostane se výsledná absorpance, která odpovídá absorpanci 3 mm materiálu bez Fresnelových odrazů.

Jak je již uvedeno v kapitole 2.6.1, propustnost exponenciálně klesá s rostoucí tloušťkou materiálu, kdežto absorpance lineárně stoupá, až na krajní případ, kde se absorpance přestává chovat lineárně. Samotné měření je prováděno v transmitanční rovině. Kvůli lineárnímu chování se následně data převedou na rovinu absorbanční pomocí vzorce  $A = 2 - \log_{10} \%T$ . Následně je proveden rozdíl absorbancí dvou rozdílných tloušťek materiálu. Tento rozdíl je proveden pro každou měřenou vlnovou délku. Rozdíl již představuje hodnotu absorpance bez fresnelových odrazů a je následně převeden zpátky do roviny transmitanční. Jelikož se absorpance chová lineárně, lze dopočítat hodnotu absorpance pro jakoukoliv tloušťku materiálu.

## 5.4 Zpracování a zobrazení naměřených dat

Pro zpracování a zobrazení dat se využíval software Matlab. Každý materiál měl dvě různé velikosti. Pro každou velikost byla sada 10ti měření. Tyto měření nejprve byly upraveny regresí pro potlačení šumového chování výsledků. Pro regresi byla využita funkce `smoothdata()`. Poté se pro každou vlnovou délku udělal průměr 10ti měření. Výsledný průměr každé vlnové délky se převedl z propustnosti na absorbanci. To samé se provedlo pro druhou tloušťku materiálu. Následně se vypočítal rozdíl absorbancí dvou různých tlouštěk. Tento rozdíl se nakonec převedl zpět do transmitance a byl vykreslen v grafu.



Obrázek 5: Útlumy na měřené trase

## 6 Měření spektrální propustnosti transparentních materiálů

### 6.1 Použité přístroje

- Stabilizovaný širokospektrální zdroj **Thorlabs SLS201L**  
Rozsah vyzařované vlnové délky 360-2600 nm
- Halogenový světelný zdroj **Ocean Optics LS-1 Tungsten**  
Rozsah vyzařované vlnové délky 360-2000 nm
- Spektrometr **AvaSpec-HS2048XL-EVO**  
Rozsah pracovní vlnové délky 200-1160 nm  
Rozlišení 1-20 nm  
Detektor CCD obrazový senzor 2048 pixelů
- SMA optické vlákno  
Průměr jádra 400  $\mu m$   
Numerická apertura 0,5 NA
- Integrační koule

### 6.2 Popis měřených transparentních materiálů

Měřené materiály byly dodané firmou Varroc Lighting Systems s.r.o. Materiály měly dvě různé formy. V této diplomové práci budou uváděny jako destičky a tyčinky, viz. obrázek 6. Destičky byly výhradně barevné a vyrobené z PMMA, kdežto tyčinky byly pouze čiré a vyrobené z PC a PMMA. Destičky měly rozměr 10x10 cm a jejich tloušťka se pohybovala od 1 do 4 mm v závislosti na daný materiál. Tyčinky měly délku 5 a 10 cm. Jejich průměr byl 7 mm. Čiré PC materiály se v případě automobilových světel používají hlavně jako světlovody, kdežto barevné PMMA je využito hlavně jako barevný filtr na zadním světlometu. Proto jsou materiály ve dvou rozdílných formách.

Výčet měřených materiálů:

**Destičky:**

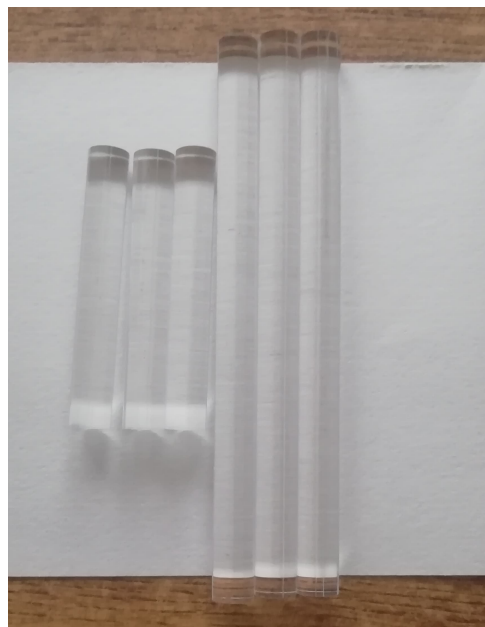
- PMMA Altuglas V825T 18241
- PMMA Altuglas V825T 18242
- PMMA Altuglas V825T 18244
- PMMA Altuglas V825T 28226
- PMMA 8N RED 33691
- PMMA 8N RED 3V124



(a) Destičky

**Tyčinky:**

- PC Iupilon HL 3303
- PC Lupoy
- PC Makrolon led 2245 ice blue
- PC Tarflon LC 1700
- PC Tarflon LC 1500
- PC Lexan XLS 1110
- PMMA Altuglas V825T 101
- PC Makrolon LED 2245 clear



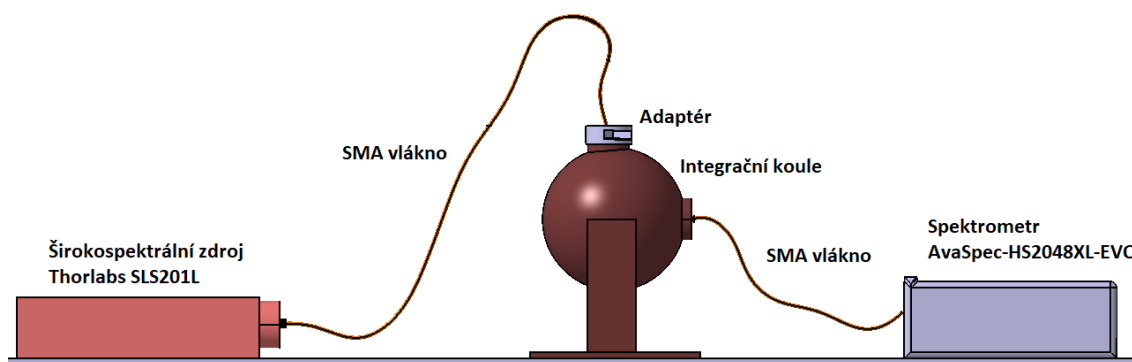
(b) Tyčinky

Obrázek 6: Dva druhy měřených materiálů

## 7 Měření spektrální propustnosti transparentních materiálů ve formě destiček

### 7.1 Nepřesná verze měření spektrální propustnosti

Obrázek č. 7 ukazuje schéma prvního způsobu měření spektrální propustnosti transparentních materiálů ve formě destiček. V této sestavě putuje světlo ze světelného zdroje přes SMA vlákno až do integrační koule. Vláknem je uchyceno adaptérem, který stabilně drží vlákno a integrační kouli dohromady. Adaptér je speciálně navržen a vytisknut pro tuhle sestavu, blíže je znázorněn na obrázku číslo 8. Z integrační koule pokračuje světlo do dalšího SMA vlákna a následně do spektrometru. Referenční měření se provádí s absencí destičky v adaptéru. Po zachycení reference se pouze vloží vyříznutý kus destičky do adaptéru a zachytí se relativní propustnost vůči referenci.



Obrázek 7: Schéma měření propustnosti pomocí integrační koule

Tento způsob měření se prokázal jako velmi nepřesný. Problém je ve fokusaci světla z adaptéru do integrační koule. Mezi výstupem SMA vlákna a integrační kouli se v adaptéru nachází komora, která slouží jako prostor pro vložení destičky. Vstup do integrační koule je relativně malý (průměr 1 cm) a při divergenci světla vycházejícího z optického vlákna  $30^\circ$  se část světla do integrační koule vůbec nedostane. Při měření s vloženou destičkou je tato část světla ztracená v komoře a v ústí integrační koule značně menší. Jelikož vložená destička více fokusuje světla směrem k ose záření, a tím pádem se více světla dostane dovnitř integrační koule. Kvůli tomuto jevu může nastat i případ, kdy dochází k výslednému zesílení neboli relativní propustnosti nad 100% oproti referenci. Tento problém by mohl být vyřešen přidáním fokusující optiky v adaptéru, což by v tomto případě bylo velmi těžko proveditelné. Měření s touto sestavou bylo proto zavrhnuto.

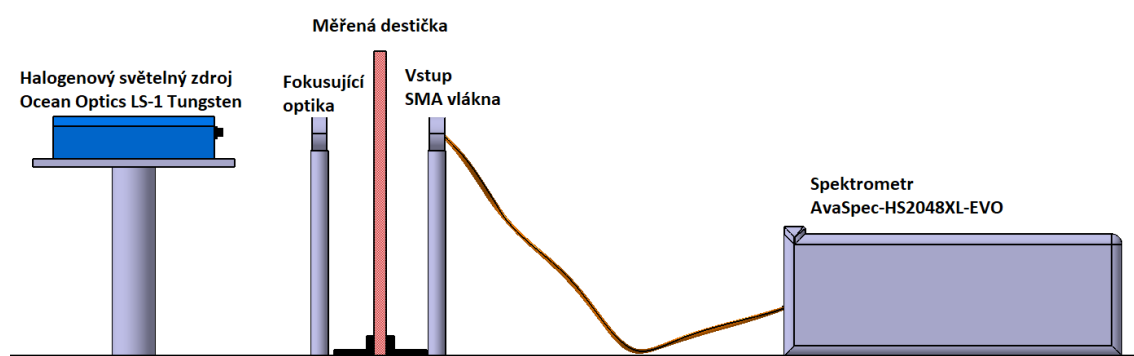


Obrázek 8: Adaptér pro uchycení optického vlákna s integrační koulí

## 7.2 Finální verze měření spektrální propustnosti

### 7.2.1 Měření destiček ve volném prostředí

Obrázek č. 9 znázorňuje schéma dalšího způsobu měření spektrální propustnosti. Zde světlo ze širokospektrálního zdroje putuje volným prostředím až do fokusující optiky, která fokusuje světlo do vstupu SMA vlákna. SMA vlákno je poté připojeno přímo do spektrometru. Reference je zachycena bez vloženého materiálu. Pro měření spektrální propustnosti se do světelné trasy mezi fokusující optiku a vstup optického vlákna vloží měřená destička.



Obrázek 9: Schéma měření propustnosti ve volném prostředí

### 7.2.2 Měření destiček pomocí spektrofotometru

Tato metoda byla ze všech zmíněných metod měření spektrální propustnosti materiálů ve formě destiček nejpřesnější. Využíval se zde přístroj Konica Minolta CM-5, kde se pouze vložila destička

a zachytila se spektrální propustnost. Tento přístroj v sobě obsahuje jak zdroj záření tak i detektor a dokonce vyhodnovací software. Dokáže přesně měřit transmitanci i reflektanci. V dalších kapitolách bude rozdíl mezi měřením ve volném prostředí a v měření Konica Minolta CM-5 blíže rozveden.

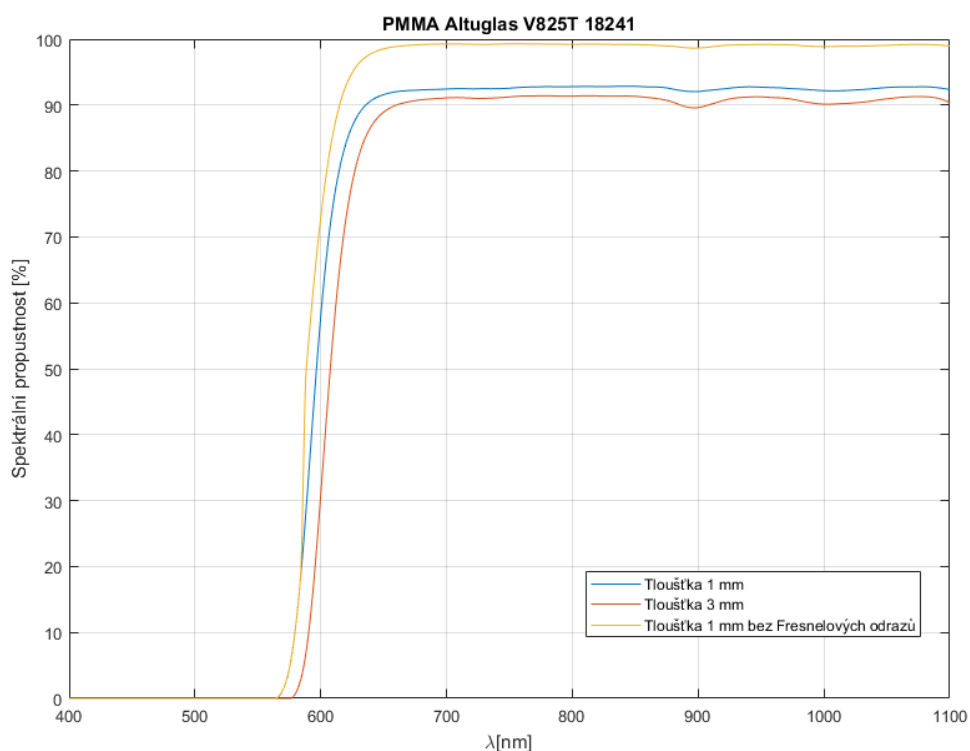


Obrázek 10: Konica Minolta CM-5 [18]

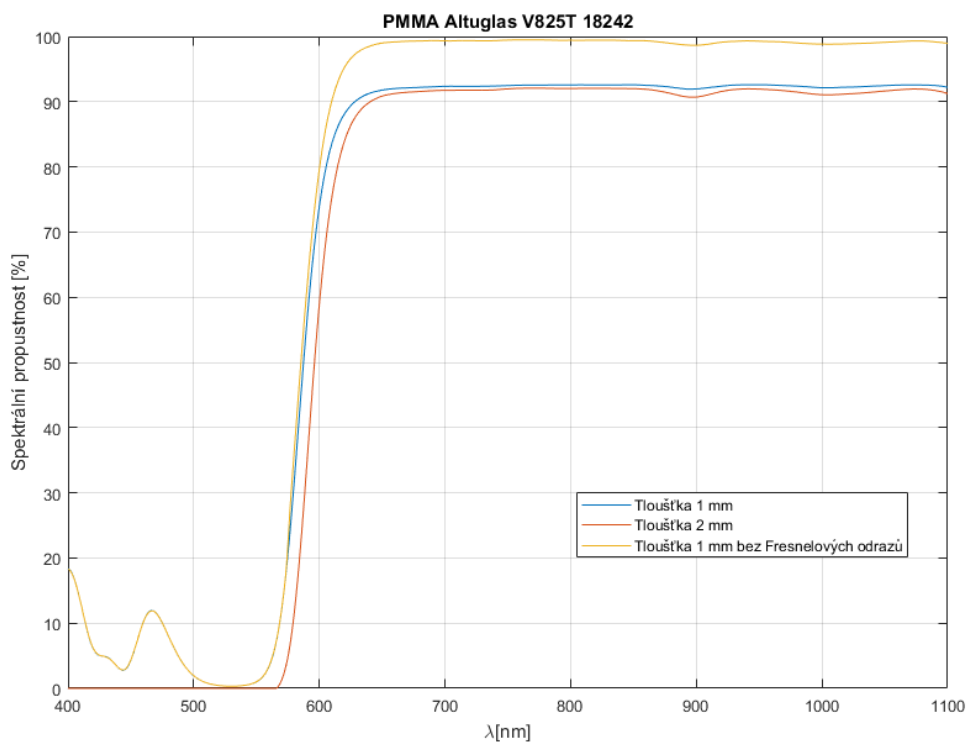


## 8 Výsledky měření spektrální propustnosti barevných destiček

Barevné destičky fungují jako spektrální filtr, který má svou propust a zadrž. V tomto případě se jednalo zásadně o červené destičky, tudíž zadrž takových destiček je v modrém spektru. Od-filtrování Fresnelových odrazů je zde provedeno pouze pro propustnou část a to ze dvou důvodů. Při velkých absorpčních hodnotách se absorpance přestává chovat lineárně, tudíž dopočítaná absorpance ze dvou tloušťek (postup z kapitoly 5.1) by mohla být zkreslená. Další důvod je ten, že útlum způsobený Fresnelovými odrazy je oproti útlumu materiálu v zadrži minimální. Následující výsledky měření spektrální propustnosti odpovídají měření ve volném prostředí. Jako příklad jsou zde uvedeny pouze dva materiály, zbylé materiály jsou uvedeny v příloze.



Obrázek 11: PMMA Altuglas V825T 18241



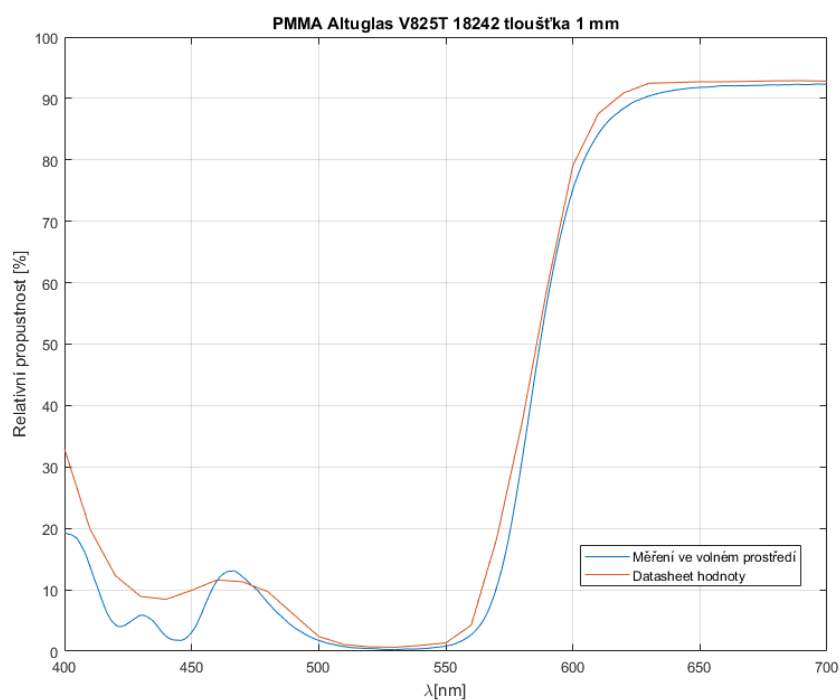
Obrázek 12: PMMA Altuglas V825T 18242

## 8.1 Ověření naměřených dat pro materiál PMMA Altuglas V825T 18242

Pro materiál PMMA Altuglas V825T 18242 byl k dispozici datasheet s korektními hodnotami propustnosti. V případě datasheetu byly hodnoty propustnosti pro vlnové délky 400-700 nm s krokem 10 nm. Následné ověřování výsledků se proto bude pohybovat v tomto rozmezí. Porovnávání je provedeno pro výsledky měření propustnosti ve volném prostředí i měření s Konica Minolta CM-5. Ověřování je rozděleno na dvě fáze, nejprve se jedná o grafické porovnání výsledků a následně i statistické metody pro potvrzení případné shody. Porovnávány jsou pouze měření s Fresnelovy odrazy.

### 8.1.1 Grafické porovnání výsledků

Obrázky 12 a 13 porovnávají výsledky měření ve volném prostředí s hodnotami datasheetu. Jelikož rozdíl mezi měřeními a datasheetem není konstantní, je srovnání rozděleno na zóny. Obrázek 15 a 16 poté znázorňuje rozdíl mezi měřeními s Konica Minolta CM-5 a datasheetem.



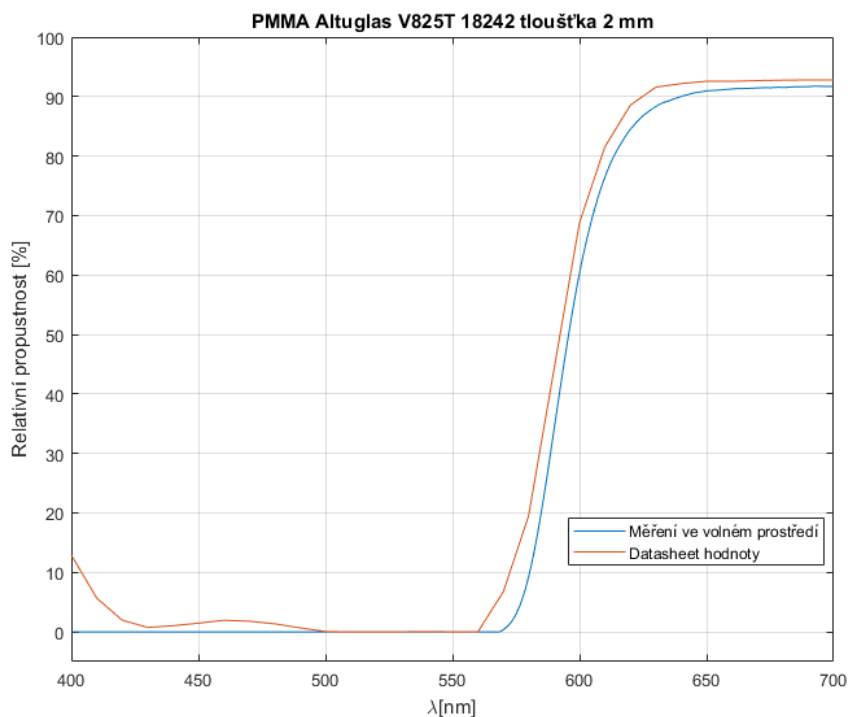
Obrázek 13: Měření ve volném prostředí vs datasheet- tloušťka 1 mm

Měření ve volném prostředí vs datasheet- tloušťka 1 mm:

- **400-450 nm** - rozdíl 4-10 %T
- **450-650 nm** - rozdíl 0-4 %T
- **650-700 nm** - rozdíl 0-1 %T

Měření ve volném prostředí vs datasheet- tloušťka 2 mm:

- **400-420 nm** - rozdíl 0-13 %T
- **420-560 nm** - rozdíl 0-2 %T
- **560-650 nm** - rozdíl 10 %T
- **650-700 nm** - rozdíl 2 %T



Obrázek 14: Měření ve volném prostředí vs datasheet- tloušťka 2 mm

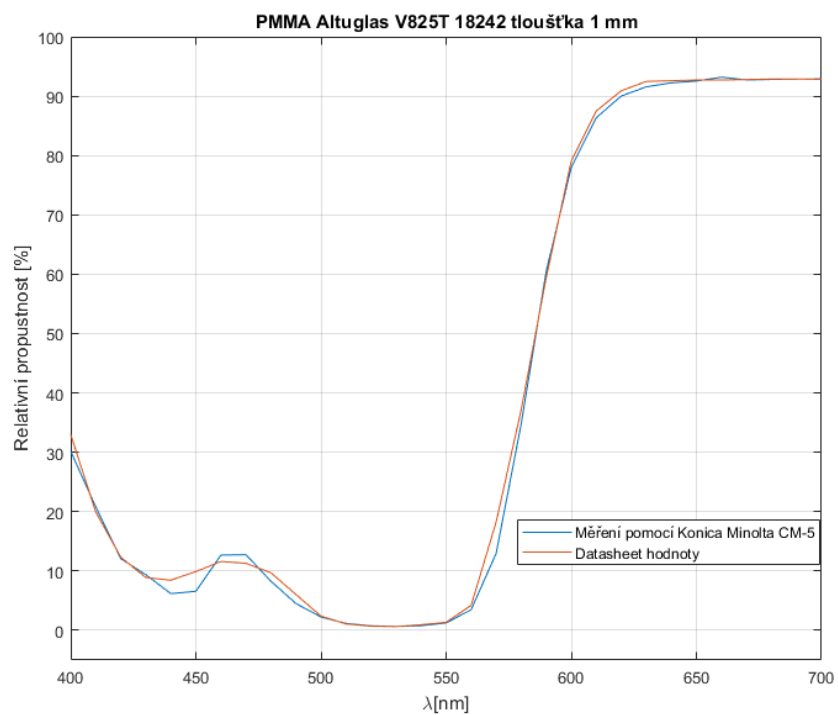
Měření s Konica Minolta CM-5 vs datasheet- tloušťka 1 mm:

- **400-500 nm** - rozdíl 0-4 %T
- **500-700 nm** - rozdíl 0-1 %T

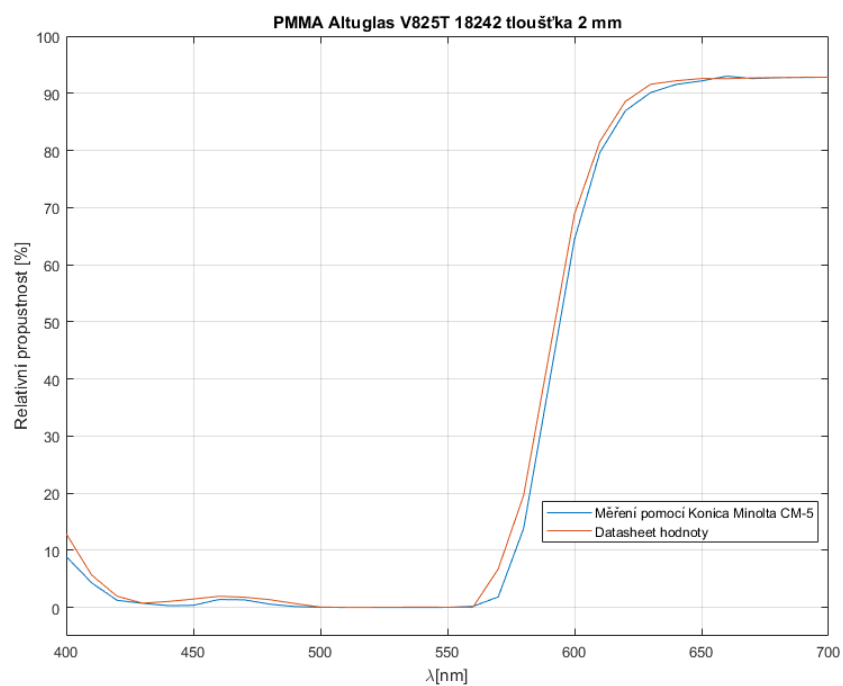
Měření s Konica Minolta CM-5 vs datasheet- tloušťka 2 mm:

- **400-560 nm** - rozdíl 0-2 %T
- **560-650 nm** - rozdíl 0-4 %T
- **650-700 nm** - rozdíl < 1 %T

Na první pohled je patrné, že měření s Konica Minolta CM-5 je blíže k hodnotám z datasheetu, kde největší rozdíl byl maximálně 4 %T. V případě měření ve volném prostředí je rozdíl oproti datasheetu vyšší, pohybuje se místy až k 10 %T. Největší rozdíly u obou případů byly v oblasti náběžné hrany, tato část grafu má velmi strmý průběh, tudíž i při malých odchylkách zde figurují velké rozdíly. Po grafickém porovnání lze tvrdit, že přesnější metoda měření je s přístrojem Konica Minolta CM-5, ovšem rozdíly mezi měřením ve volném prostředí a datasheetem nejsou natolik velké, aby se tato měřicí metoda zavrhnula.



Obrázek 15: Měření s Konica Minolta CM-5 vs datasheet- tloušťka 1 mm



Obrázek 16: Měření s Konica Minolta CM-5 vs datasheet- tloušťka 2 mm

### 8.1.2 Statistické porovnání výsledků

Statistické testování je provedeno pro materiál PMMA Altuglas V825T 18242 s tloušťkou 1 mm. Na hladině významnosti 5% se otestuje, zda-li střední hodnota propustnosti z naměřených dat odpovídá hodnotě propustnosti v datasheetu. Jelikož data mají charakteristiku normálního rozdělení, jako nástroj pro statistické vyhodnocení se využije jednovýběrový Studentův t-test. Testování je uskutečněno pro všechny vlnové délky uvedené v datasheetu, jedná se tedy o vlnové délky 400 nm až 700 nm s krokem 10 nm.

Definice hypotéz:

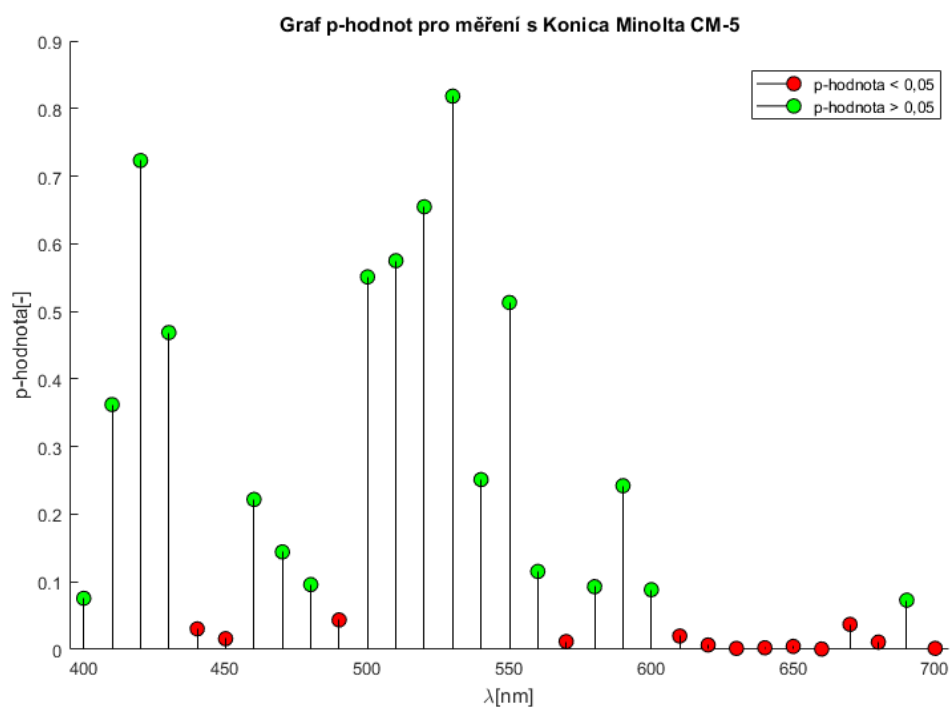
$$H_0 : \mu = \mu_0$$

$$H_A : \mu \neq \mu_0$$

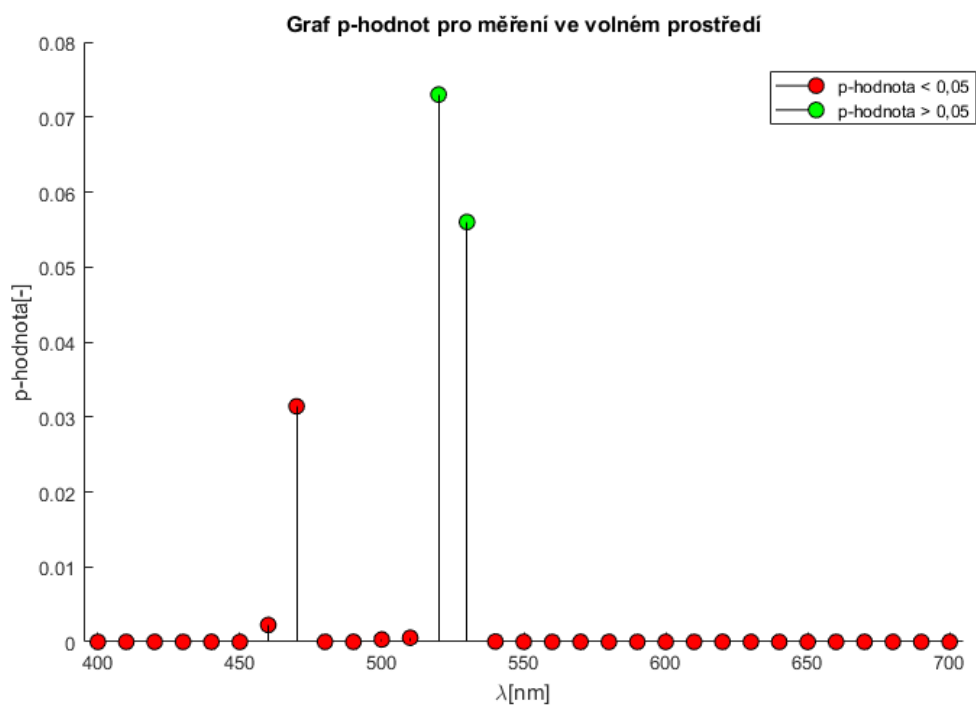
Kde  $\mu$  je střední hodnota propustnosti z naměřených dat vždy pro konkrétní vlnovou délku,  $\mu_0$  je hodnota propustnosti uvedená v datasheetu.

Výstupem každého z těchto testů je p-hodnota, která je poté zobrazena v grafu (obrázek č. 17, 18). S ohledem na hladinu významnosti 5% se nulová hypotéza zamítá v případě, kdy je p-hodnota menší jak 0,05. V grafu jsou p-hodnoty menší jak 0,05 zobrazeny červeně, p-hodnoty větší jak 0,05 zeleně.

Výsledky statistických testů jednoznačně potvrdily předpoklad z grafického porovnání, tedy že měření s Konica Minolta CM-5 odpovídalo více hodnotám propustnosti z datasheetu než-li v případě měření ve volném prostředí. Při porovnání měření s Konica Minolta CM-5 a datasheetem se nulová hypotéza nezamítala v 18ti případech a ve zbylých 13ti případech se nulová hypotéza zamítala. V případě porovnání měření ve volném prostředí a datasheetem se nulová hypotéza nezamítala pouze ve dvou případech, ve zbylých 29ti případech se nulová hypotéza zamítala. Tohle vypovídá značně ve prospěch měření s Konica Minolta CM-5, lze tedy říci, že měření tímto způsobem bylo přesnější.



Obrázek 17: T-test pro měření s Konica Minolta CM-5 a datasheetem



Obrázek 18: T-test pro měření ve volném prostředí a datasheetem

## 8.2 Ověření korektnosti dat na simulacích

Smyslem této diplomové práce bylo vytvoření přesných hodnot propustnosti pro určité materiály. Účelem bylo zpřesnit predikce simulací, tedy aby výstup simulace více odpovídal reálným hodnotám. Cílem této kapitoly je určení věrohodnosti predikce vůči reálnému měření. Simulace se provádí v software Catia v kombinaci s LightTools. Nejprve se namodeluje geometrie v Catii, této geometrii se přiřadí materiálové vlastnosti, určí se světelný zdroj a následně se celé objekty překopírují do LightTools, který tyto vstupy zpracuje a vytvoří simulaci. Výstupem je následně mapa svítivosti. Tato mapa svítivosti má různé velikosti a různou hustotu, podle zvolených parametrů uživatele. Vždy se ale jedná o body svítivosti v různých úhlech od optického středu. V případě reálného měření se měřený objekt umístí na goniometr, který posouvá objekt do různých úhlů s určitým krokem. Na druhé straně leží pevně připevněný detektor, který snímá svítivost vycházející z daného objektu. Výstupem je zase mapa svítivosti.

V této kapitole budou ověřovány všechny materiály v podobě destiček. Simulace i reálné měření se provádělo za pomoci speciálního přípravku, který je zobrazen na obrázku 20. Přípravek byl namodelován v Catii tak, aby přesně odpovídal své reálné kopii. Vlevo na stojanu se nacházela bílá LED se světelným tokem 21 lm. Tato LED svítila do otvoru kruhového tvaru, kde byla možnost připevnit měřenou destičku. Pro predikci se nastavily hodnoty propustnosti destičky podle naměřených dat. Přesněji se použily data z měření ve volném prostředí. Po uskutečnění simulací se provedlo reálné měření, kde vstupní podmínky byly totožné se simulací. Tedy bylo důležité mít všechny podmínky totožné s parametry v simulaci, například vzdálenost LED od destičky, světelný tok LED, spektrální charakteristika LED, stejné uchycení destičky apod. Výstup ze simulace a z reálného měření se poté porovnal. Přesněji se neporovnávaly jednotlivé body svítivosti, ale celkový světelný tok v mapě. Čím více si světelné toky odpovídaly, tím více byla predikce a tím pádem i hodnoty propustnosti přesnější.

Ověřeny tímto způsobem byly všechny měřené materiály. Jelikož přesnost predikce vůči skutečnému měření závisí na spoustě faktorů, není tento způsob ověřování rozhodný, ale jedná se pouze o orientační metodu. Výsledek je zobrazen v tabulce č.2. Rozdíl mezi simulací a reálným měřením je v tabulce zobrazen jako absolutní i relativní. Až na dvě anomálie v případě 11,70 % a 12,32 % se rozdíly pohybovaly do 9 %. Rozdíly takových rozměrů svědčí o správnosti hodnot spektrální propustnosti.



Materiál	Tloušťka [mm]	Rozdíl [lm]	Rozdíl [%]
PMMA Altuglas V825T 18241	1	0,35	11,70
	3	0,01	5,47
PMMA Altuglas V825T 18242	1	0,03	7,15
	2	0,01	2,83
PMMA Altuglas V825T 18244	1	0,02	3,28
	3	0	0,02
PMMA Altuglas V825T 28226	1	0	0,08
	2	0,02	2,22
PMMA 8N RED 33691	2	0,05	4,73
	4	0,06	8,73
PMMA 8N RED 3V124	2	0,01	3,57
	4	0,02	12,32

Tabulka 2: Porovnání simulace s reálným měřením

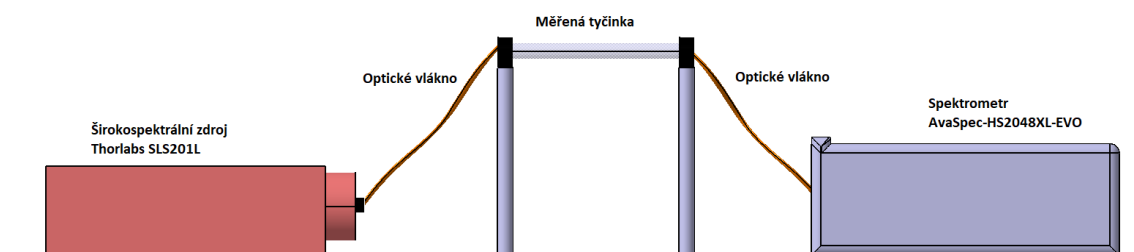
## 9 Měření spektrální propustnosti transparentních materiálů ve formě tyčinek

Tyčinky dodané firmou Varroc Lighting Systems s.r.o. byly délky 5 cm a 10 cm s průměrem 7 mm. Pro měření spektrální propustnosti jsou využity jako světlovody, kde světlo prochází pomocí totálních vnitřních odrazů celou délkou tyčinky a velikost útlumu světla v tyčince diktuje spektrální propustnost materiálu. Pro získání spektrální propustnosti bez Fresnelových odrazů bylo zapotřebí provést měření spektrální propustnosti dvou rozdílných délek. Jelikož se výsledná propustnost počítala z rozdílu měření dvou odlišných délek, mohla být intenzita reference, vůči které se měřila spektrální propustnost, libovolně velká, ale větší než intenzita měření kratší tyčinky pro každou měřenou vlnovou délku. Reference zde sloužila pouze pro určení průběhu propustnosti nikoliv pro její relativní velikost.

### 9.1 Nepřesné verze měření spektrální propustnosti

#### 9.1.1 Uchycení tyčinky pomocí stojanu

V této prvotní verzi byla tyčinka upevněna na stojanu. Měřicí soustava je znázorněna na obrázku č. 19. Ze širokospektrálního zdroje putovalo světlo skrze SMA vlákno do tyčinky a z tyčinky do dalšího SMA vlákna, které bylo napojeno do spektrometru. Uchycení tyčinky mezi optickými vlákny je zobrazen na obrázku č. 20. Pro měření reference byl výstup optického vlákna, které bylo připojeno na světelný zdroj, upevněn naproti vstupu optického vlákna, které směřovalo do spektrometru. Pro měření propustnosti samotné tyčinky se mezi optické vlákna upevnila měřená tyčinka a odebrala se spektrální propustnost vůči referenci. Poté se měřená tyčinka odebrala, do trasy se vložila delší nebo kratší tyčinka a zachytila se další spektrální propustnost. Obecně platí, že po zachycení reference se s měřenou sestavou co nejméně manipuluje. Jakákoliv sebe-menší změna, která by měnila trasu nebo chování světla, se mnohonásobně projeví na samotném výsledku a vnese do měření chybu. Zde není důležité mít identické podmínky jak pro referenci tak i pro samotné měření. Ovšem je zde velmi důležité zajistit identické podmínky pro měření kratší a delší tyčinky. Požadovaný rozdíl mezi těmito měřeními by měl být pouze v absorpci dvou rozdílných délek. Například při délkách 2 cm a 6 cm by měl být rozdíl mezi měřeními spektrální propustnosti způsobený pouze absorpcí světla ve 4 cm materiálu. Proto musí být zamezena jakákoliv změna měřicí soustavy mezi měřeními těchto dvou rozdílných délek, aby tato změna nevnesla do měření chybu. 1. verze měřicí soustavy tohle nesplňovala. V situaci, kdy se v sestavě měnila kratší tyčinka za delší (nebo naopak), se manipulovalo s přijímacím optickým vláknem a se stojanem, který uchycoval tyčinku. Samotné tyčinky bylo téměř nereálné upevnit tak, aby jejich uchycení bylo identické. Taktéž i optické vlákno bylo nemožné upevnit stejným způsobem jako při původním měření. Tohle všechno vnášelo do měření nemalou chybu. Proto se měření tímto způsobem zavrhl.



Obrázek 19: Schéma měření propustnosti prvotní verze



Obrázek 20: Uchycení měřené tyčinky stojanem

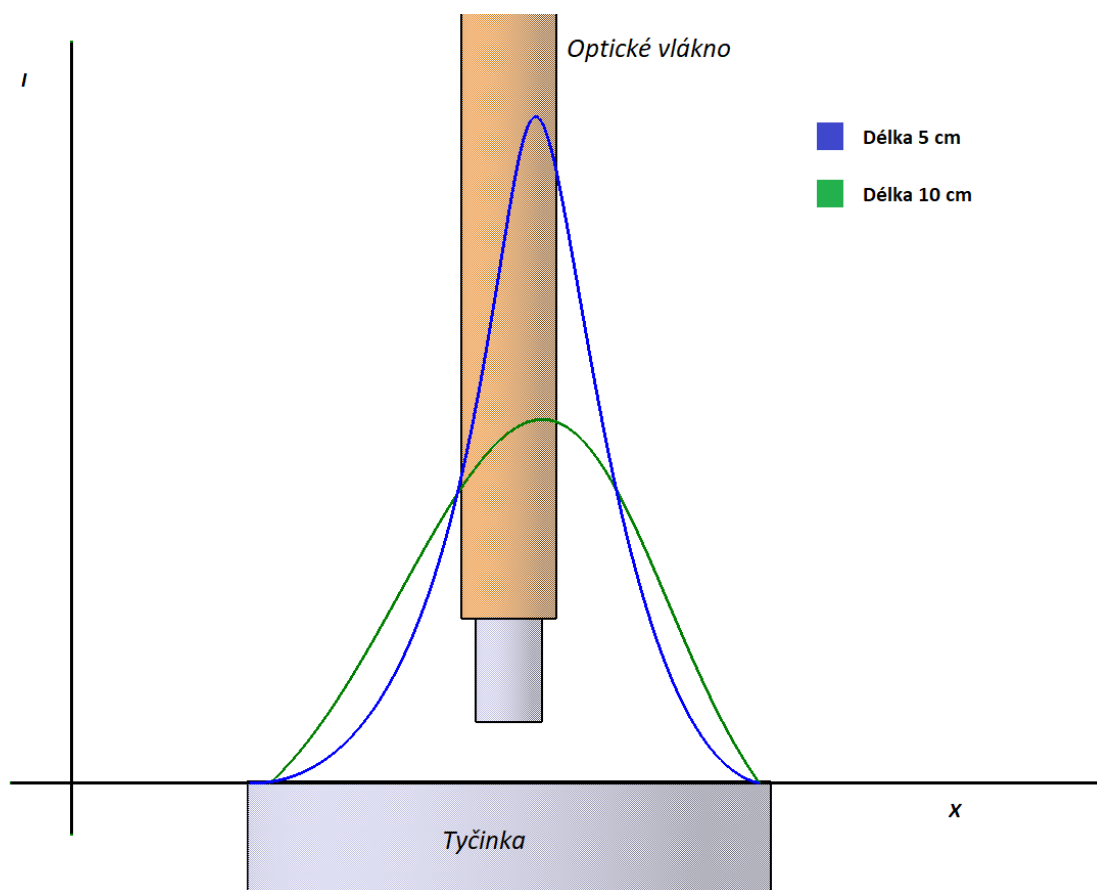
### 9.1.2 Uchycení tyčinky pomocí speciálního adaptéru

Ve druhé verzi je lépe řešeno napojení vlákna s tyčinkou a také absence stojanu pro tyčinky. Schéma zapojení je velmi podobné jako je v předešlém případě s tím rozdílem, že tyčinka není uchycena na stojanu ale k optickému vláknu je připevněna speciálním adaptérem. Tento adaptér slouží k pevnému upevnění tyčinky k optickému vláknu. Adaptér byl navržen v programu Catii a následně vytisknut na 3D tiskárně. Příklad uchycení je ukázán na obrázku 21. Jelikož jsou podmínky pro obě měření(kratší a delší tyčinky) totožné, řeší to problém prvotní verze. I přes vyřešení tohoto problému bylo měření nadále velmi nepřesné. Stále zde figuroval jeden

velký problém. Tím je množství světla navazující se do druhého optického vlákna směřující do spektrometru. Průměr tyčinky byl 7 mm, kdežto průměr optického vlákna byl 400  $\mu\text{m}$ . To je několikanásobně menší průměr a navázalo se tedy i několikanásobně méně světla z tyčinky do vlákna. Tohle by ovšem nebyl problém v případě, kde světelná distribuce na výstupu tyčinky by byla pro obě délky stejná. Profil světelné intenzity na výstupu 5 cm tyčinky byl odlišný oproti profilu světelné intenzity na výstupu 10 cm tyčinky. Tím pádem byly obě měření velmi odlišná právě kvůli rozdílné distribuci světla na výstupu tyčinky. Příklad možného rozdělení světelného výkonu na konci tyčinky je ukázáno na obrázku č. 22. Jedná se pouze o ilustraci, grafy vykreslené na obrázku nevychází z reálných dat.



Obrázek 21: Uchycení měřené tyčinky adaptérem

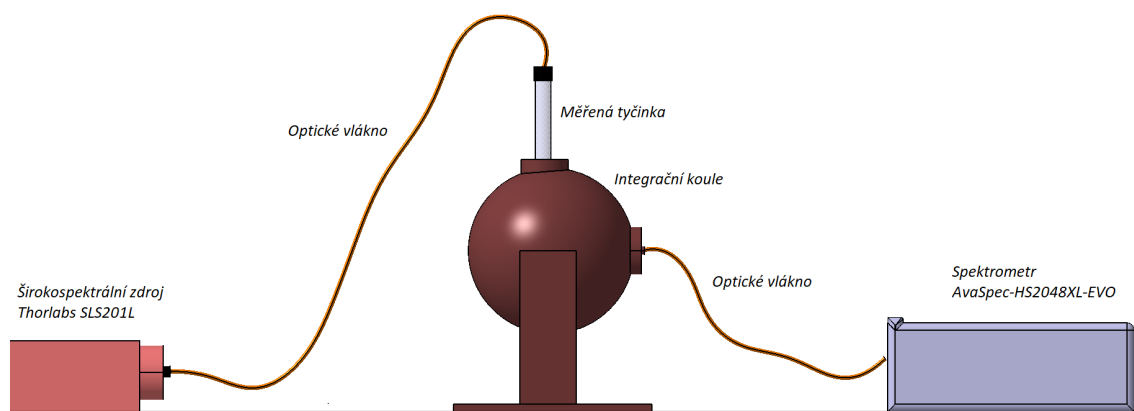


Obrázek 22: Distribuce světla na konci tyčinky

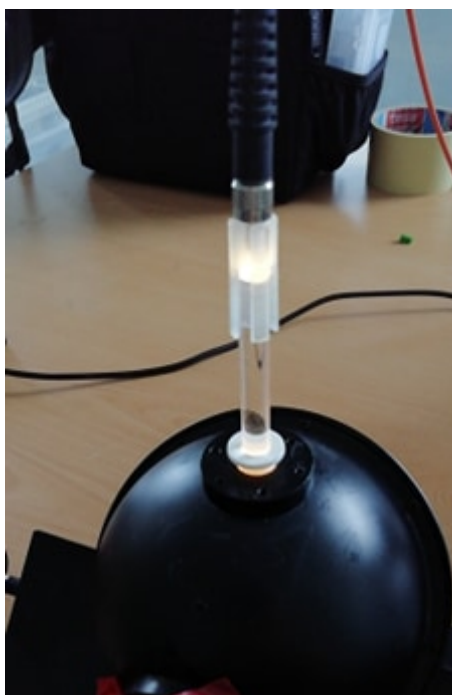
## 9.2 Přesná verze měření spektrální propustnosti

### 9.2.1 Měření spektrální propustnosti pomocí integrační koule

V minulé kapitole byly popsány nekorektní sestavy pro měření spektrální propustnosti ve formě transparentních tyčinek. Z problémů minulých sestav tato správná sestava vychází a logicky je napravuje. Logické řešení problému s rozdílnou distribucí světla u různých délek tyčinky je ve smyslu pojmutí veškerého světla, které z tyčinky vychází. Tohle je uskutečněno pomocí integrační koule. Integrační koule dokáže reflektovat veškeré světlo na vstup optického vlákna. Obrázek 23 ukazuje způsob implementace do původní sestavy. Pro uchycení optického vlákna s tyčinkou a také uchycení tyčinky s integrační koulí je řešeno speciálními součástky, které byly speciálně pro tento případ navrženy a vytisknuty ve 3D tiskárně. Na obrázku č. 24 je tohle uchycení znázorněno. V tomto případě jsou podmínky měřicí sestavy stejné jak pro 5 cm tak pro 10 cm dlouhou tyčinku. Tudíž nic nepřekáží pro přesné měření spektrální propustnosti. Správnost výsledků je ověřena v následujících kapitolách.



Obrázek 23: Měření spektrální propustnosti pomocí integrační koule



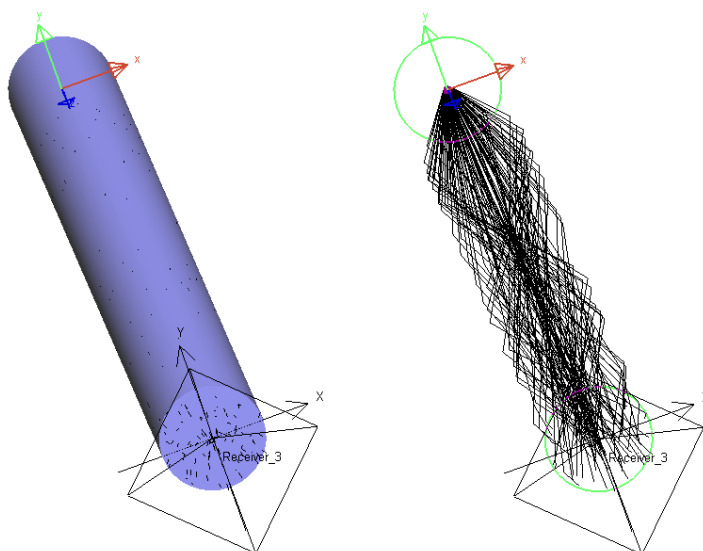
Obrázek 24: Uchycení tyčinky do integrační koule

### 9.3 Skutečná světelná trasa v měřených tyčinkách

Jak již bylo uvedeno, měřené tyčinky měly délku 5 a 10 cm. Měřená spektrální propustnost se vždy vztahovala k těmto délkám. Jelikož se světlo pohybovalo v tyčinkách pomocí totálních odrazů, jejich výsledná trasa bude větší, než-li je délka tyčinky. Proto bylo nutné vypočítat skutečnou světelnou trasu v tyčince. Zjištění této skutečné trasy bylo uskutečněno za pomoci software LightTools. V LightTools se provedla simulace se stejnými parametry jako při měření spektrální propustnosti. Numerická apertura používaného SMA vlákna je 0,5. V simulaci je použitý zdroj bodový, s výstupním kuželem  $30^\circ$ . Dále byly namodelovány tyčinky, které měly stejné rozměry jako reálné měřené tyčinky. Po dokončení simulace byly jednotlivé paprsky přiřazeny do skupin podle počtu odrazů od stěny tyčinky. Délka trasy paprsků v daných skupinách byla velmi podobná, proto se vždy změřila délka jednoho paprsku a tato délka nadále reprezentovala délku paprsků celé skupiny. Podle počtu paprsků v jednotlivých skupinách se vypočítal vážený průměr ze všech měřených délek paprsků. Následující tabulka ukazuje vypočítané trasy, které světlo v tyčince urazí. Světelná trasa se od délky tyčinky liší pouze v setinách cm, v následné úpravě dat relativní propustnosti se tato skutečnost projeví minimálně.

Délka tyčinky [cm]	Skutečná světelná trasa [cm]	
	PC	PMMA
5	5,035	5,047
10	10,086	10,102

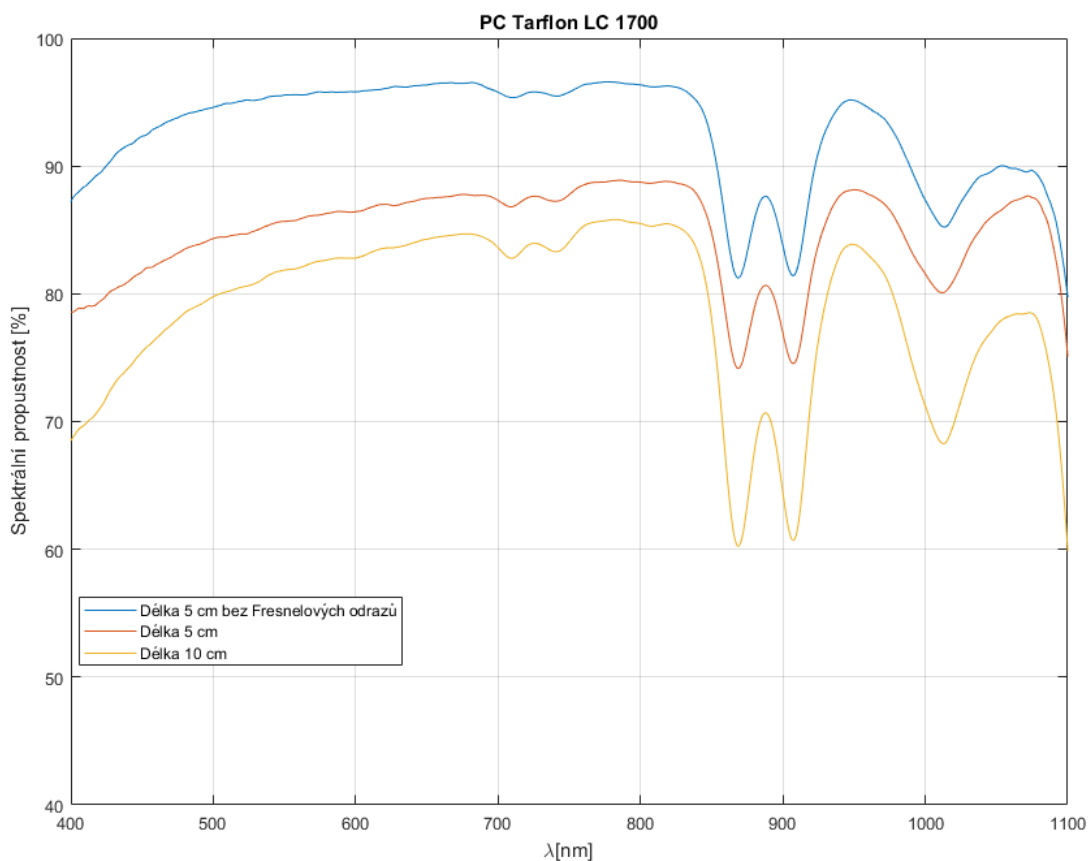
Tabulka 3: Skutečné hodnoty světelné trasy v tyčince



Obrázek 25: Simulace prováděná v programu LightTools

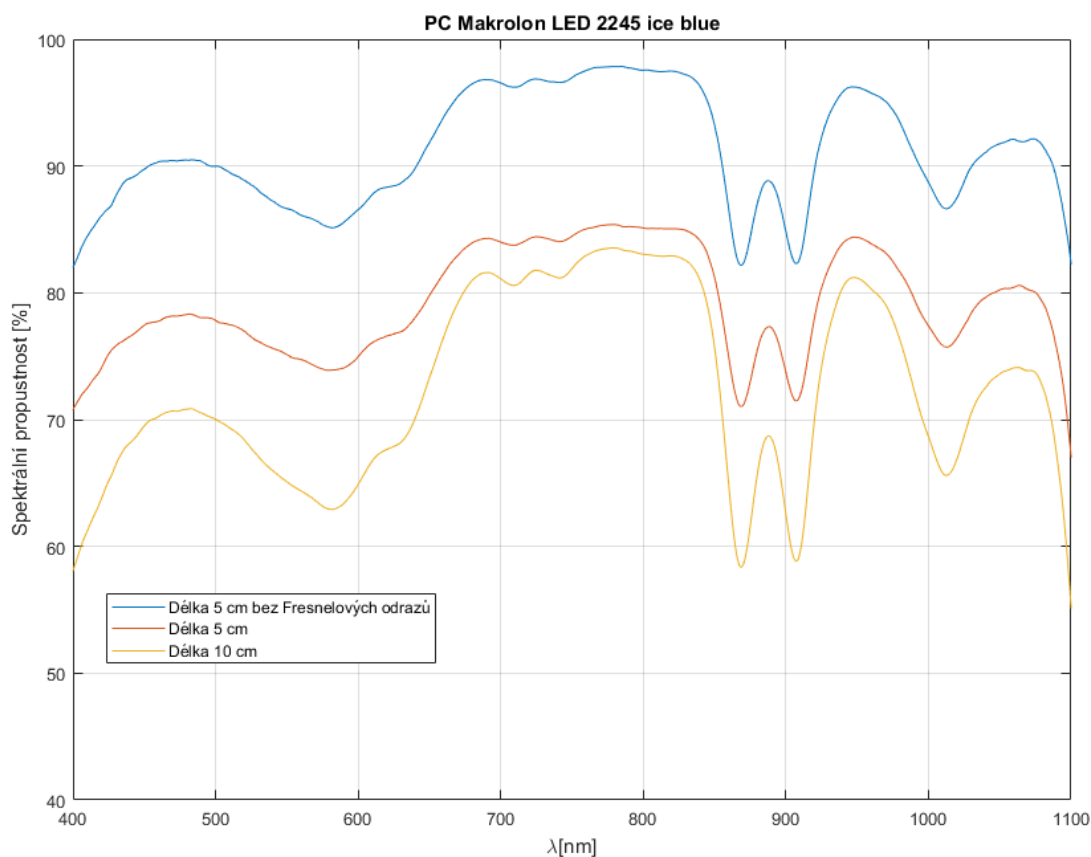
## 10 Výsledky měření spektrální propustnosti tyčinek

Výsledky jsou zobrazeny stejným způsobem jako v případě barevných destiček. Jsou zde předvedeny pouze dva materiály z osmi celkových. Jedná se o PC Tarflon 1700 a PC Makrolon led 2245 ice blue, grafy zbylých materiálů jsou umístěny v příloze. Tyčinky nemají žádnou barvu, v každém případě se jedná o čirý transparentní materiál. Oproti barevným destičkám nemají v celém měřeném spektru výraznou absorpční část. Ovšem také neplatí, že by měly konstantní relativní propustnost po celém měřeném spektru.



Obrázek 26: PC Tarflon 1700



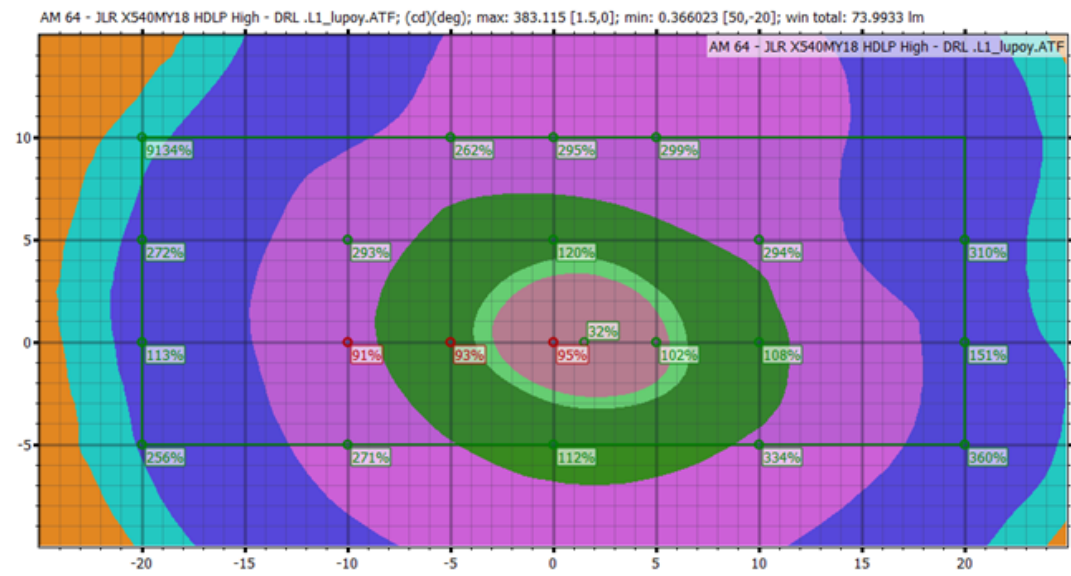


Obrázek 27: PC Makrolon led 2245 ice blue

### 10.1 Ověření korektnosti dat spektrální propustnosti tyčinek

Ověření se provádělo velmi podobným způsobem jako v případě barevných destiček. V případě tyčinek se jedná pouze o ověřování na simulacích oproti reálnému měření. Postup ověřování je stejný jako v kapitole 8.2. V této kapitole se ověřují celkové světelné toky v mapách z reálného měření oproti tokům ze simulace. Stejně jako bylo zmíněno v 8.2, podmínky pro měření a simulaci musí být totožné, aby se odstranily veškeré vedlejší vlivy. Oproti barevných destiček je zde ověřování řešeno na reálné automobilové lampě. Přesněji se jednalo o denní svícení. Tohle denní svícení bylo řešeno světlovodem. K dispozici byly 3 různé materiály tohoto světlovodu. Pro každý tento materiál se provedlo reálné měření, kde lampa byla připevněna na goniometr, a simulace, kde se pro světlovod použily data spektrální propustnosti. Jelikož se v tomto případě jednalo o celou lampu, hrálo zde roli několik faktorů a spektrální propustnost byla pouze jeden z nich. Výsledky ověřování jsou tedy pouze orientační, nelze tvrdit, že rozdíl mezi světelným tokem reálného měření a simulací je také rozdílem správnosti spektrální propustnosti oproti naměřeným hodnotám. Ukázka možného výstupu z měření je na obrázku 28, následné ověřování je v tabulce číslo 4. Z výsledků je patrný malý rozdíl mezi reálným měřením a simulací. Predikce,

které se liší od skutečného měření do 10% lze považovat za velmi věrohodné. Tímto ověřením se nevyvrátila korektnost dat spektrální propustnosti.



Obrázek 28: PC Lupoy mapa

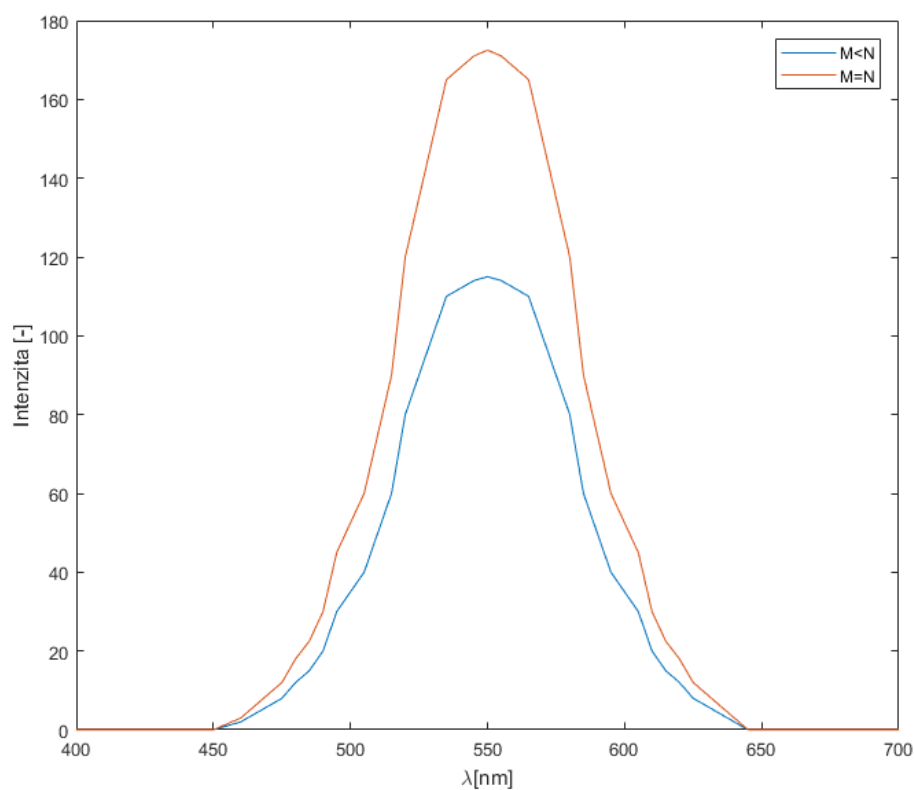
Materiál	Rozdíl [lm]	Rozdíl [%]
PC Lupoy	2,4	3,1
PC Makrolon led 2245 ice blue	4,6	7
PC Lexan	0,7	1

Tabulka 4: Porovnání světelných toků simulace oproti reálnému měření

## 11 Měření spektrální propustnosti luminoforu

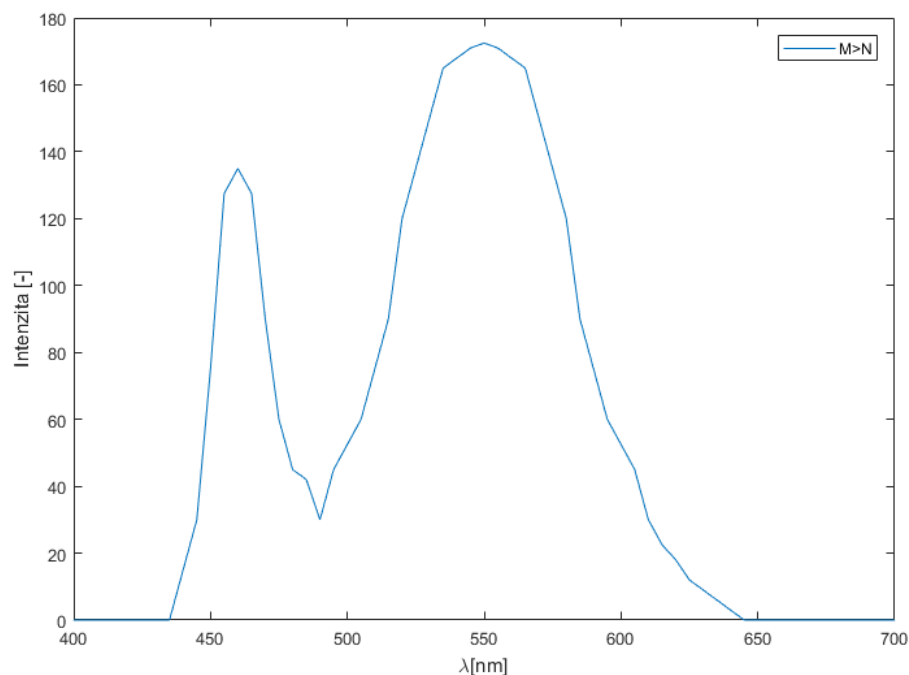
### 11.1 Teoretický předpoklad

Na základě luminiscence luminofor absorbuje fotony a následně je vyzáří s nižší energií, tudíž s delší vlnovou délkou. V této kapitole budeme uvažovat případ, kdy 1 částice luminoforu dokáže absorbovat a následně vyzářit 1 foton v jednom čase. Pokud na luminofor o  $N$  částic dopadá světlo s vlnovou délkou 465 nm, v momentě, kdy se počet fotonů  $M$  bude rovnat počtu částic  $N$  v určitém místě luminoforu, bude luminofor maximálně nasycen. Tohle by platilo pouze v případě, kdy částice luminoforu i fotony by měly stejné rozložení v prostoru. V případě, kdy bude počet fotonů  $M$  větší než počet luminoforových částic v určitém místě luminoforu, nedokáže luminofor absorbovat veškeré dopadající světlo a tím pádem část fotonů prochází bez změněných vlastností. Obrázky číslo 29 a 30 ukazují 3 různé případy pro výstupní záření z luminoforu v závislosti na počtu fotonů  $M$  a počtu luminoforových částic  $N$  při dopadajícím světle s vlnovou délkou 465 nm.



Obrázek 29: Příklad kdy  $M < N$  a  $M = N$

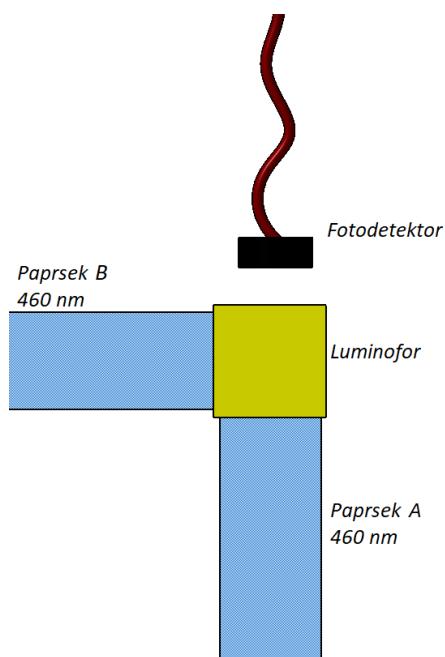
Důležitá implikace této úvahy je patrná při použití dvou na sobě nezávislých paprsků. Pro vizualizaci slouží obrázek číslo 31. V tomto konkrétním případě figuruje luminofor ve tvaru kvá-



Obrázek 30: Příklad kdy  $M > N$

dru, který je osvětlen dvěma na sobě nezávislými a kolmými paprsky s vlnovou délkou 465 nm. Pro lepší přehlednost jsou označeny jako paprsek A a paprsek B. Naproti paprsku A je fotodetektor, který snímá světlo vystupující z luminoforu. Uvažujme, že paprsek A plně nasycuje luminofor a paprsek B není aktivní. V takovém případě by mělo být výstupní spektrum, které fotodetektor zaznamenává, stejné jako na obrázku č. 29. V případě, kdy jsou aktivní oba paprsky, je maximálně nasycená oblast luminoforu nasycena právě fotony z obou paprsků, a tím pádem luminoforové částičky nedokáží absorbovat další fotony a část světla z paprsku A prochází beze změny. V takovém momentě by mělo na fotodetektor dopadat světlo s podobným spektrem jaké je zobrazeno na obrázku č. 30. Jinými slovy se může hladina výkonové úrovně v okolí 465 nm ovládat dvěma na sobě nezávislými paprsky.

Předpokládejme, že by fotodetektor ze schématu číslo 31 snímal pouze světlo s vlnovou délkou 465 nm a jako výstup by byla výkonová úroveň dopadajícího světla. Pokud bychom zvolili dva stavy výkonové úrovně, kde nad určitou hranicí by byla logická 1 a pod touto hranicí by byla logická 0, vznikl by tímto jednoduchý logický člen AND. Tabulka 5 ukazuje pravdivostní tabulku tohoto logického členu v závislosti na aktivním paprsku A,B.



Obrázek 31: Teoretické schéma

$X_1$ (Paprasek A)	$X_2$ (Paprasek B)	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Tabulka 5: Pravdivostní tabulka závislosti dvou paprsků

## 11.2 Praktická realizace

### Použité přístroje

- LED zdroj 465 nm - **Thorlabs Epoxy-Encased LED**

FWHM 25 nm

Optický výkon při 20 mA= 20 mW

- Spektrometr **AvaSpec-HS2048XL-EVO**

Rozsah pracovní vlnové délky 200-1160 nm

Rozlišení 1-20 nm

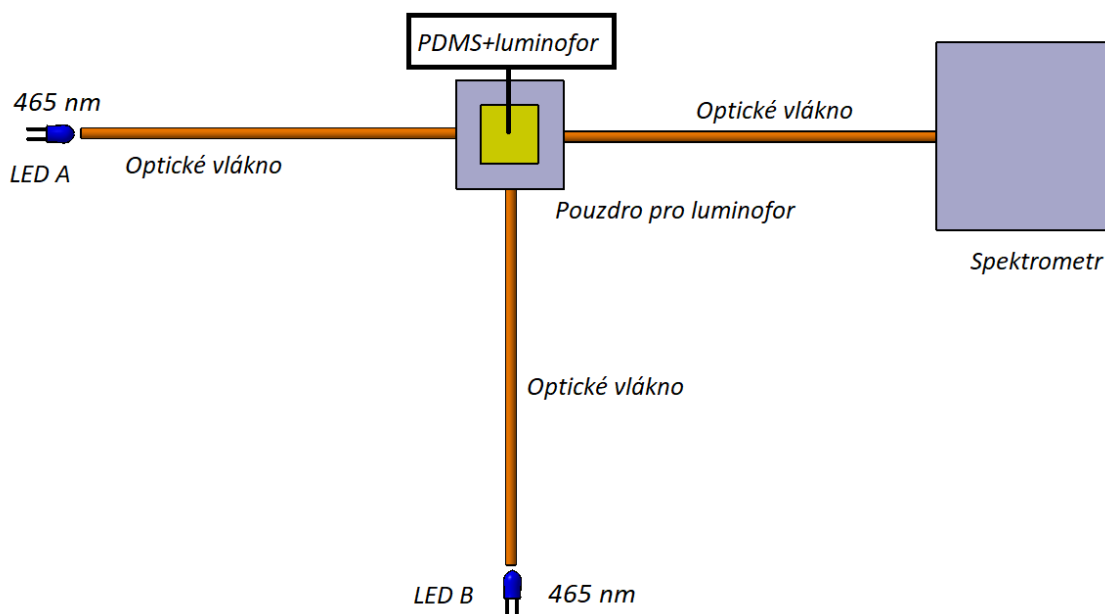
Detektor CCD obrazový senzor 2048 pixelů

- SMA optické vlákno

Průměr jádra 400  $\mu m$

Numerická apertura 0,5 NA

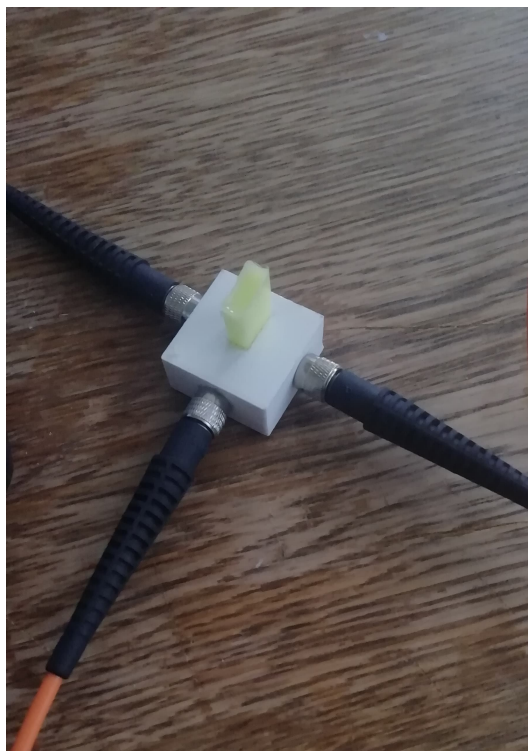
Praktická realizace přímo vychází z teoretického předpokladu. Schéma praktické realizace je na obrázku číslo 32. Schéma zapojení je na velmi podobné bázi jako na obrázku číslo 31. Základní myšlenka, která je popsána v teoretickém předpokladu, je zde dodržena. Na luminofor dopadají dva na sebe kolmé paprsky o vlnové délce 465 nm. Světlo je generováno pomocí LED, následně je navázáno do SMA optického vlákna, které směřuje do otvoru speciálního pouzdra pro luminofor. Ze třetí strany pouzdra vede optické vlákno, do kterého vstupuje výstupní světlo z luminoforu, a navazuje do spektrometru. V pouzdře není pouze holý luminofor, ale jedná se o směs luminoforu s polydimetylsiloxanu. PDMS je v tuhém tvaru a má pro tuhle aplikaci vynikající vlastnosti jakými jsou transparentnost a čírost materiálu. V pouzdře se tedy nachází tuhý elastický kvádr, kde je luminofor rovnoměrně rozložený v určitém poměru vůči PDMS. Pouzdro je navrženo a vytisknuto speciálně pro tuhle sestavu. Nachází se v něm prostor pro PDMS s luminoforem a také se zde nachází otvory v jednotlivých stěnách pro vstup optického vlákna. Na obrázku 33 se nachází ukázka části zapojení, kde je zobrazeno pouzdro s luminoforem a také napojení na optické vlákna.



Obrázek 32: Schéma zapojení

### 11.2.1 Tvorba směsi PDMS s luminoforem

Pro tvorbu polydimetylsiloxanu se využil SYLGARD 184. SYLGARD 184 je čirý, středně viskózní kapalný silikon. Aby výsledná směs byla v tuhém stavu, použila se při tvorbě i druhá složka, která sloužila jako vytvrzovací činidlo. Pro správný výsledek se musel smíchat tekutý silikon s vytvrzovacím činidlem v poměru 10:1. Po přidání vytvrzovacího činidla se do směsi přidal i luminofor v různém poměru. Správný poměr luminoforu vůči PDMS je velmi důležitý, protože udává celkovou hustotu luminoforu v směsi, a tím pádem i propustnost světelného záření. Po



Obrázek 33: Pouzdro pro směs luminoforu s PDMS

přidání luminoforu do směsi byla potřeba směs pečlivě promíchat, aby v ní luminofor byl rozprostřen rovnoměrně. Tohle se docílilo pomocí třepačky na zkumavky. Po důkladném promíchání byla směs připravena na zatvrdnutí. Vytvrzovací činidlo reagovalo na vysoké teploty. Při teplotě 70 °C po 30ti minutách byla směs v tuhé podobě a připravena pro vložení do speciálního pouzdra.

### 11.2.2 Způsob ověření teoretického předpokladu

Pro ověření teoretického předpokladu se bude používat takový poměr luminoforu vůči PDMS, aby platilo, že počet luminoforových částic  $N$  je menší než počet fotonů  $M$  v místě procházejícího paprsku. Základní myšlenkou teoretického předpokladu je, že část paprsku modrého světla prochází luminoforem bez jakékoliv změn po maximálním nasycení luminoforu. Kvůli tomuto se použije pouze malý poměr luminoforu vůči PDMS, aby se zajistil stav, kde luminofor bude každopádně maximálně nasycený. Nastává zde tedy situace, kde luminofor je maximálně nasycený i v případě, kdy je aktivní pouze jeden LED zdroj. V případě aktivace i druhého paprsku by mělo dojít k výraznému nárůstu modré složky (tedy vlnové délky našeho LED zdroje). Měla by ovšem i narůst zelená a červená složka, tedy světlo emitující z částic luminoforu, protože jeden paprsek nedokáže pokrýt celý objem směsi luminoforu s PDMS. Pokud tedy bude aktivní pouze paprsek A nebo paprsek B, budou na spektrometru dva výrazné extrémy. První extrém odpovídá modré složce našeho LED zdroje, tedy jedná se o fotony, které nebyly absorbovány

luminoforem. Druhý extrém je v rozmezí od zelené do červené složky, jedná se o fotony vyzářené luminoforem po absorpci modré složky. Jak již bylo zmíněno, při aktivaci obou paprsků by mělo dojít k výraznému nárůstu právě modré složky, protože luminofor absorbuje a následně vyzáří pouze část z obou paprsků, prochází substrátem více modré složky, než-li v případě pouze jednoho aktivního paprsku. Pokud je tato úvaha správná, součet jednotlivých spekter, kdy je aktivní pouze paprsek A nebo paprsek B, by měl být odlišný než-li spektrum v případě aktivních obou paprsků. Přesněji řečeno by modré maximum mělo být výraznější v případě aktivních obou paprsků oproti jejich součtu.

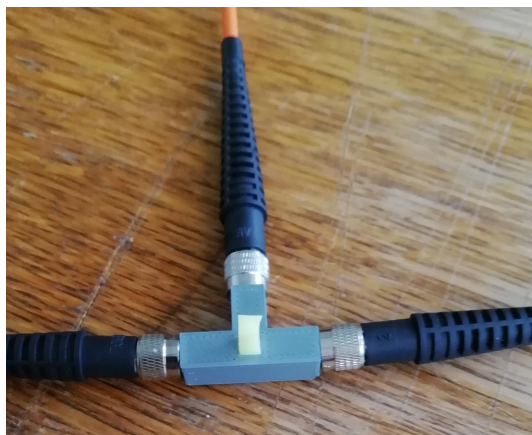
### 11.2.3 Výsledky praktické realizace

Finální poměr luminoforu vůči PDMS byl použit 1:50. Výsledky měření jsou ve formě spekter výstupního záření, které spektrometr zaznamenal. Pouzdro pro luminofor z obrázku 33 nebylo vyhovující z prostého důvodu a tím byla velikost díry pro luminofor. Problém spočíval ve velikosti paprsku vystupujícího z optického vlákna oproti velikosti finální směsi. Druhý paprsek vygenerovaný z LED B měl jen malý vliv na propustnost paprsku z LED A, protože většina světelné energie se přemění na vyšší vlnové délky než má vůbec možnost se dostat do trasy paprsku A. Z tohoto důvodu se přešlo na novou verzi pouzdra, které je vyzobrazeno na obrázku č. 34.

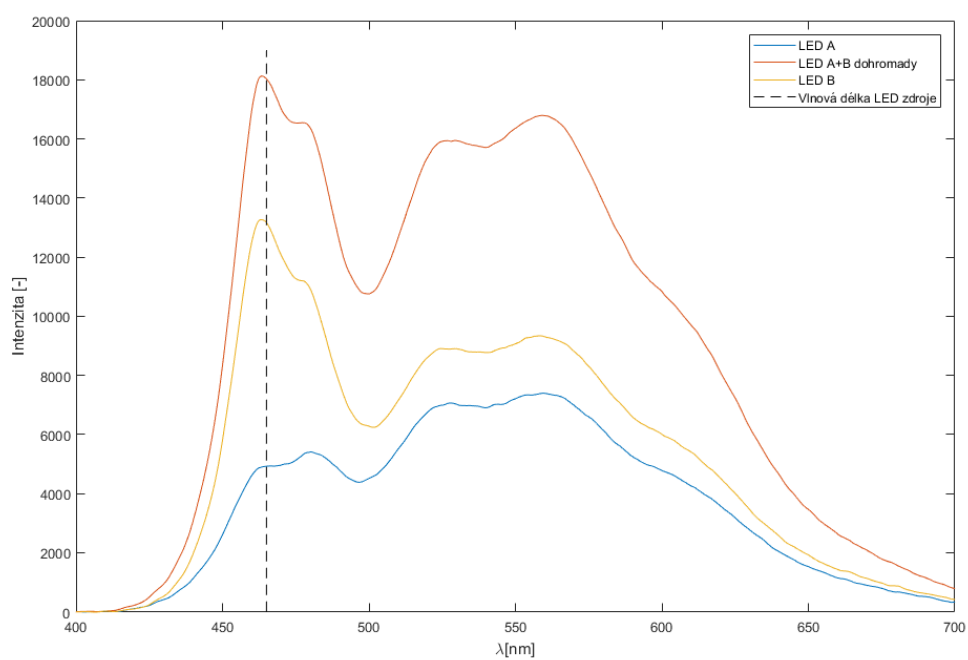
V nové verzi pouzdra je výrazně menší díra pro směs luminoforu s PDMS. Její velikost je 4x4 mm, tudíž odstraňuje problém předešlé verze a paprsek generovaný z LED B se nyní výrazněji kříží s paprskem generovaným z LED A. Nová verze pouzdra také neobsahuje přebytečný materiál.

Výsledky praktické realizace budou formulovány stejným způsobem, který je popsán v předešlé kapitole 11.2.2. Obrázek 35 ukazuje výsledné spektrum v případě, kdy je aktivní pouze paprsek A nebo B a také ukazuje spektrum, kdy jsou aktivní oba dva paprsky. Další graf na obrázku 36 zobrazuje porovnání spekter. Přesněji řečeno se zde porovnává spektrum v případě aktivních obou paprsků a součet spekter dvou měření, kde je aktivní pouze jeden paprsek A nebo B. Dle teoretického předpokladu se očekává, že modré maximum ve spektru bude značně výraznější v případě aktivních dvou paprsků, než-li modré maximum v součtu spekter jednotlivých měření. Dle výsledného grafu tomu tak není a spektra jsou si rovna. Je zde tedy patrné ideální lineární chování. Tento výsledek implikuje fakt, že paprsek B nemá žádný vliv na průchod paprsku A luminoforem. Teoretický předpoklad se tedy tímto měřením nepotvrdil. Důvodem je nejspíše nedostatečné nasycení luminoforu. Pro dostatečné nasycení luminoforu by bylo zapotřebí zvýšit výkon LED, snížit koncentraci luminoforu vůči PDMS nebo snížit objem celkové směsi.

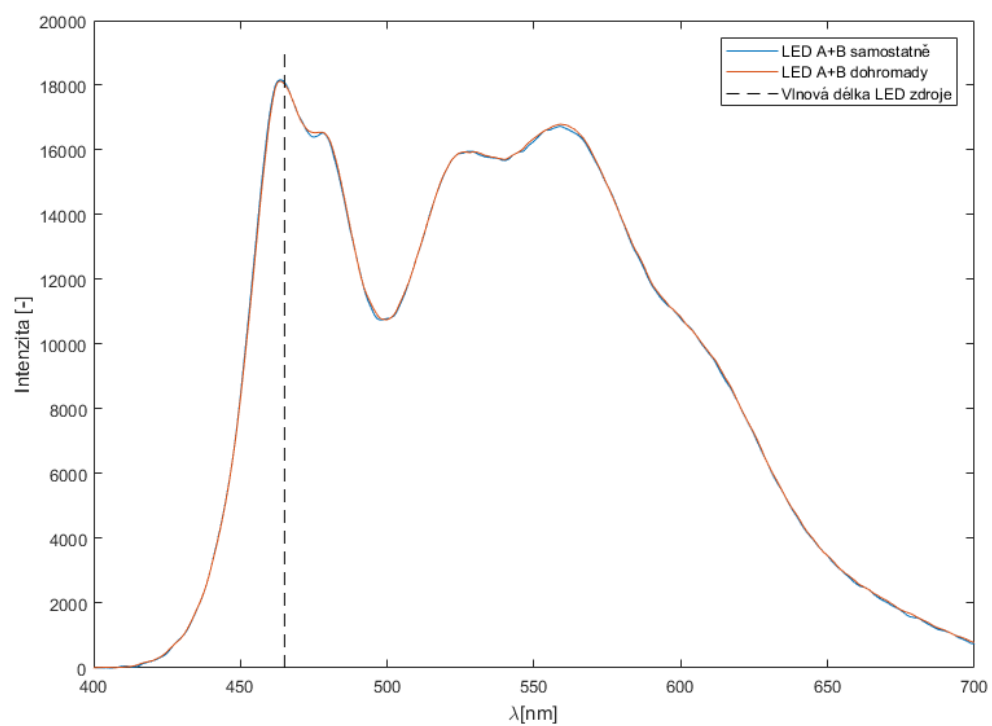




Obrázek 34: Nová verze pouzdra pro směs luminoforu s PDMS



Obrázek 35: Výsledek jednotlivých složek měření



Obrázek 36: Výsledné ověření teoretického předpokladu

## 12 Závěr

Na začátku se tato diplomová práce věnuje základním optickým vlastnostem. Nejprve se práce dívá na světlo z pohledu vln a obsahuje popis vlnových a Maxwellových rovnic. Nechybí zde i popis světla z pohledu geometrické optiky, kde jsou vysvětleny základní jevy jakými jsou lom a odraz světla či index lomu. Dále se práce orientuje na problematiku spektrální propustnosti. Základním zákonem pro správné pochopení spektroskopie je Beer-Lambertův zákon, který je v této práci popsán. Na to navazuje samostatná problematika spektroskopie a také popis interakce světla s transparentními materiály. Je zde kladen i důraz na popis luminiscence a její dělení. Obsáhlá část této práce se také věnuje spektrometru. Tato část obsahuje podrobnější popis jednotlivých komponentů spektrometru, jejich význam a parametry. Poslední důležitá kapitola v teoretické části se zabývá popisem transparentních materiálů, které se v této práci vyskytovaly.

Před samostatnou praktickou částí se v diplomové práci vyskytuje metodika měření. Metodika měření nejprve popisuje, jakým způsobem je řešena problematika spektrální propustnosti v automotive. Poté přechází na popis řešení této problematiky v samotné diplomové práci. Je zde logicky popsán způsob měření spektrální propustnosti, problém s Fresnelovými odrazy a nastiňuje různá možná řešení pro tento problém a její implementaci. Důležitou součástí je také popis zpracování dat tím způsobem, aby došlo k odfiltrování vlivu Fresnelových odrazů.

Samotná praktická část začíná popisem měřených materiálů, které dodala firma Varroc Lighting Systems s.r.o. Podle těchto materiálů je dále praktická část rozdělena na 2 části. Jelikož materiály byly ve dvou různých formách, popsány jako destičky a tyčinky, pohled na problematiku měření spektrální propustnosti těchto dvou rozdílných materiálů byl naprosto odlišný. Proto je praktická část, která se zabývá spektrální propustností, rozdělena na spektrální propustnost destiček a spektrální propustnost tyčinek.

Pro oba druhy materiálů platilo, že nebyl předem známý korektní způsob měření spektrální propustnosti. Ať už se jedná o destičky nebo tyčinky, bylo prováděno několik způsobů měření spektrální propustnosti. Několik z nich je v této práci podrobněji popsáno a uvedeno, zda se jedná o správný či nesprávný způsob měření. V případě destiček byly dva finální způsoby měření spektrální propustnosti. Jednalo se o měření ve volném prostředí a pomocí spektrofotometru. U materiálu PMMA Altuglas V825T 18242 byly k dispozici katalogové hodnoty propustnosti pro několik vlnových délek. Toho se využilo pro zjištění korektnosti měřících metod. Obě měřící metody byly nejprve graficky a poté i statisticky porovnány s katalogovými hodnotami. U grafického porovnání byl rozdíl mezi metodou měření ve volném prostředí oproti katalogovým hodnotám v rozmezí od 0 %T do 10 %T, kdežto v případě spektrofotometru to bylo v rozmezí od 0 %T do 4 %T. Statistické porovnání potvrdilo předpoklad, že měření spektrální propustnosti pomocí spektrofotometru je přesnější než-li měření ve volném prostředí. U měření pomocí spektrofotometru se většina hodnot statisticky rovnala s hodnotami z datasheetu. V případě měření ve volném prostředí se statisticky rovnaly pouze dvě hodnoty, ve zbylých 29ti případech se nulová hypotéza zamítala. Z těchto porovnání vyšlo najevo, že nejpresnější metoda měření

spektrální propustnosti destiček byla pomocí spektrofotometru. Další zásadní část spočívala v ověření věrohodnosti výsledků pomocí porovnání predikce s reálným měřením. V případě destiček byly relativní rozdíly mezi predikcí a reálným měřením až na dvě odlehlé hodnoty v rozmezí od 0 % do 9 %. Jelikož zde hrálo roli spousta faktorů, takové rozdíly lze požadovat za velmi uspokojivé. S ohledem na kombinaci ověření pomocí katalogových hodnot s ověřením pomocí predikce lze konstatovat, že výsledné hodnoty propustnosti jsou věrohodné.

Měření spektrální propustnosti ve formě tyčinek mělo velmi podobnou strukturu jako v případě destiček. Nejprve byly popsány různé způsoby měření. Každý způsob byl podrobněji popsán a bylo i případně vysvětleno, proč je daný způsob nesprávný. Jednotlivé způsoby měření na sebe logicky navazovaly a každý další způsob řešil problémy předchozí verze. Nakonec z předložených způsobů vyvstal způsob měření spektrální propustnosti pomocí integrační koule. Pomocí adaptérů, které byly speciálně navrženy a vytisknuty pro tuhle finální sestavu, vznikl správný způsob měření spektrální propustnosti ve formě tyčinek. Jelikož se tyčinka chovala jako světlovod, bylo zapotřebí vyřešit problém se skutečnou délkou světelné trasy v materiálu. Tento problém byl vyřešen za pomoci softwaru LightTools. Stejně jako u destiček, tak i zde bylo provedeno ověřování korektnosti formou porovnání predikce se skutečným měřením. Porovnávány byly 3 různé materiály a pro každý tento materiál platilo, že relativní rozdíl mezi predikcí a skutečným měřením se pohyboval od 1 % do 7 %. I v případě tyčinek jsou tyto rozdíly velmi uspokojivé a lze považovat výsledné hodnoty spektrální propustnosti za věrohodné.

Poslední zásadní část praktické části zkoumala teoretický předpoklad, který se zabývá propustností luminoforu. Teoretický předpoklad udává, jakým způsobem se změní propustnost luminoforu, pokud dojde k jeho maximálnímu nasycení. Tato část diplomové práce nastiňuje problematiku propustnosti luminoforu, důsledky této problematiky a způsob ověření teoretického předpokladu. Způsob ověření spočíval ve využití dvou paprsků, které v této diplomové práci byly označeny jako paprsek A a B. Předpokládalo se, že součet intenzit jednotlivých měření při aktivaci paprsku A nebo B bude rozdílný, než-li měření, kde byly aktivní oba paprsky. Ukázalo se, že součet jednotlivých měření se rovná samostatnému měření, kde byly aktivní oba paprsky. Je zde tedy očividné lineární chování, které neodpovídá teoretickému předpokladu. Důvodem nejspíše je nedostatečné nasycení luminoforu. Tento problém by se mohl vyřešit zmenšením objemu směsi PDMS s luminoforem, zmenšením koncentrace luminoforu vůči PDMS nebo zvýšením výkonu LED.

Návazností na tuhle práci by mohly být témata věnující se podrobnějšímu zkoumání propustnosti luminoforu nebo zkoumání propustnosti transparentních materiálů s rozptylovými vlastnostmi.

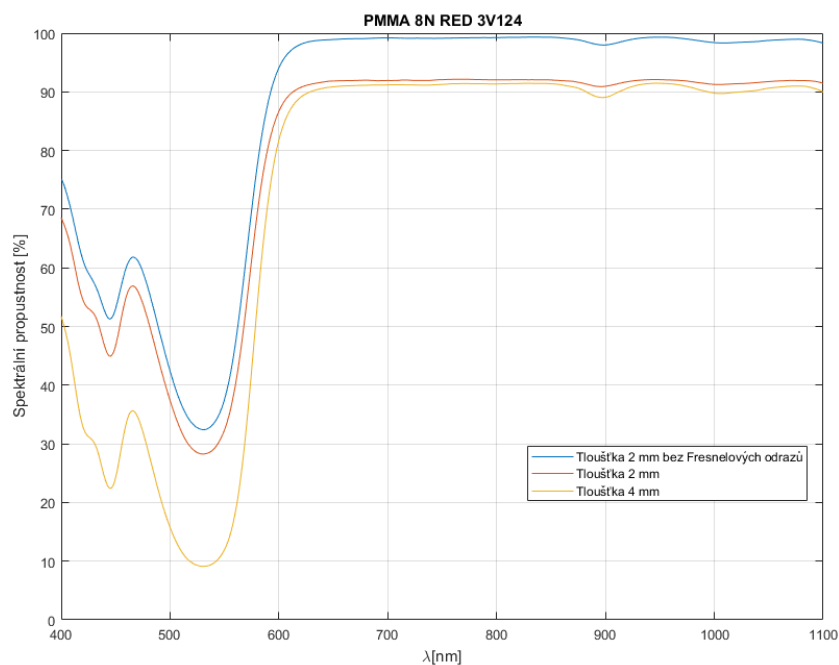
## Literatura

- [1] MALÝ, Petr. *Optika*. Praha: Karolinum, 2008. ISBN 978-80-246-1342-0
- [2] ŠTRBA, Anton, Vladimír MESÁROŠ a Dagmar SENDERÁKOVÁ. *Svetlo: vlny, lúče, fotony*. Nitra: Enigma, 2011. ISBN 978-80-89132-83-6
- [3] WYPYCH, George. Handbook of material weathering. Fifth edition. Toronto: ChemTec Pub., [2013]. ISBN 9781895198621.
- [4] GERMER, Thomas A., Joanne C. ZWINKELS a Benjamin K. TSAI. Spectrophotometry: accurate measurement of optical properties of materials. Amsterdam: Academic Press, [2014]. Experimental methods in the physical sciences, v. 46. ISBN 9780123860224.
- [5] Spectrophotometry - Chemistry LibreTexts. Home - Chemistry LibreTexts [online]. Copyright © Copyright 2019 Chemistry LibreTexts [cit. 23.10.2019]. Dostupné z: [chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\\_Textbook\\_Maps/Supplemental\\_Modules\\_\(Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\)/Kinetics/Reaction\\_Rates/Experimental\\_Determination\\_of\\_Kinetics/Spectrophotometry](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Kinetics/Reaction_Rates/Experimental_Determination_of_Kinetics/Spectrophotometry)
- [6] teaching.shu.ac.uk [online]. Dostupné z: <https://teaching.shu.ac.uk/hwb/chemistry/tutorials/molspec/beers1.htm>
- [7] AN UPDATE ON FUNDAMENTALS OF UV- VISIBLE SPECTROSCOPY | PharmaTutor. PharmaTutor | Pharmacy Infopedia [online], [cit. 23.10.2019]. Dostupné z: <https://www.pharmatutor.org/articles/update-on-fundamentals-of-uv-visible-spectroscopy?page=3%2C3>
- [8] ŠÍŠKA, Petr. Nekomunikační Aplikace Optických Vlákien [online]. [cit. 30.10.2019] Skripta. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra telekomunikační techniky.
- [9] CRONEY, J. Fluorescence spectroscopy in biochemistry: teaching basic principles with visual demonstrations. Biochemistry and Molecular Biology Education [online]. 29(2), 60-65 [cit. 2019-10-30]. DOI: 10.1016/S1470-8175(01)00019-4. ISSN 14708175
- [10] Šiška, Petr. Optoelektronika [online]. 2014 [cit. 30.10.2019] Skripta. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra telekomunikační techniky.
- [11] Spectroscopy: The Slit. 301 Moved Permanently [online]. Copyright © Copyright 2014 [cit. 04.11.2019]. Dostupné z: <https://www.optecks.com/Portal/index.php/knowledge-center/spectroscopy-root/spect3>
- [12] [online]. Dostupné z: <https://www.optecks.com/Portal/index.php/knowledge-center/spectroscopy-root/spect7>

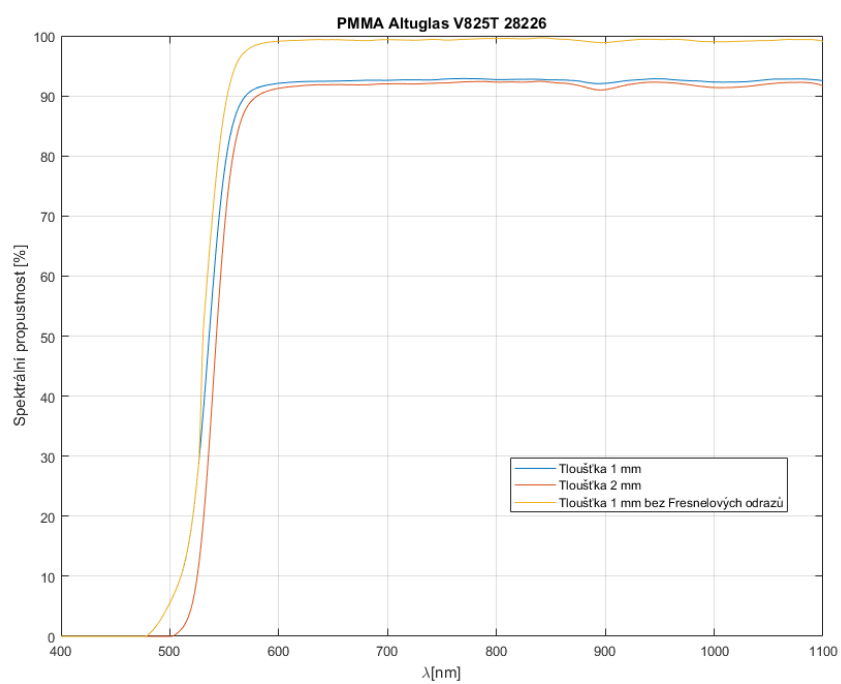
- [13] Part 2: The Grating - B&W Tek. Spectroscopy | Instrumentation | Solutions | Spectrometer Manufacturer [online]. Copyright © 2019 B [cit. 04.11.2019]. Dostupné z: <https://bwtek.com/spectrometer-part-2-the-grating/>
- [14] Scientific American. Science News, Articles, and Information - Scientific American [online]. Copyright © 2019 Scientific American, a Division of Springer Nature America, Inc. [cit. 05.11.2019]. Dostupné z: <https://www.scientificamerican.com/article/what-determines-whether-a/>
- [15] Polycarbonate (PC) Plastic: Properties, Uses, & Structure - Guide. Plastic Materials | Free Online Database for Plastic Industry [online]. Copyright © SpecialChem 2019 [cit. 05.11.2019]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polycarbonate-pc-plastic>
- [16] PMMA Plastics Poly(methyl methacrylate): Properties, Uses & Application. Plastic Materials | Free Online Database for Plastic Industry [online]. Copyright © SpecialChem 2020 [cit. 26.01.2020]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polymethyl-methacrylate-pmma-acrylic-plastic>
- [17] VÁCLAVÍK, Adam. Analýza optických prvků z Polydimethylsiloxanu (PDMS) [online]. Ostrava, 2016 [cit. 2020-01-26]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/115972>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [18] Spectrophotometer CM-5 - Konica Minolta Color, Light, and Display Measuring Instruments. Konica Minolta Sensing - Color, Light and Display Measuring Instruments [online]. Copyright © 2020 Konica Minolta Sensing Singapore Pte Ltd [cit. 16.03.2020]. Dostupné z: <https://sensing.konicaminolta.asia/product/cm-5-spectrophotometer/>
- [19] Shahpaski, M., Sapaico, L.R., & Süssstrunk, S. (2019). Comparative analysis of transmittance measurement geometries and apparatus. *electronic imaging*, 2019, 477-1-477-7.
- [20] Galeotti, Francesco & Mróz, Wojciech & Catellani, Marinella & Kutrzeba-Kotowska, Bogumilla & Kozma, Erika. (2016). Tailorable perylene-loaded fluorescent nanostructures: a multifaceted approach enabling application in white hybrid LEDs. *Journal of Materials Chemistry C*. 10.1039/C6TC00486E.
- [21] Michael Bass, Casimer DeCusatis, Jay Enoch, Vasudevan Lakshminarayanan, Guifang Li, Carolyn Macdonald, Virendra Mahajan, and Eric Van Stryland. 2009. *Handbook of Optics, Third Edition Volume II: Design, Fabrication and Testing, Sources and Detectors, Radiometry and Photometry* (3rd. ed.). McGraw-Hill, Inc., USA.
- [22] How Does a Spectrometer Work?. Spectroscopy | Instrumentation | Solutions | Spectrometer Manufacturer [online]. Copyright © 2020 B [cit. 13.05.2020]. Dostupné z: <https://bwtek.com/spectrometer-introduction/>

## Přílohy

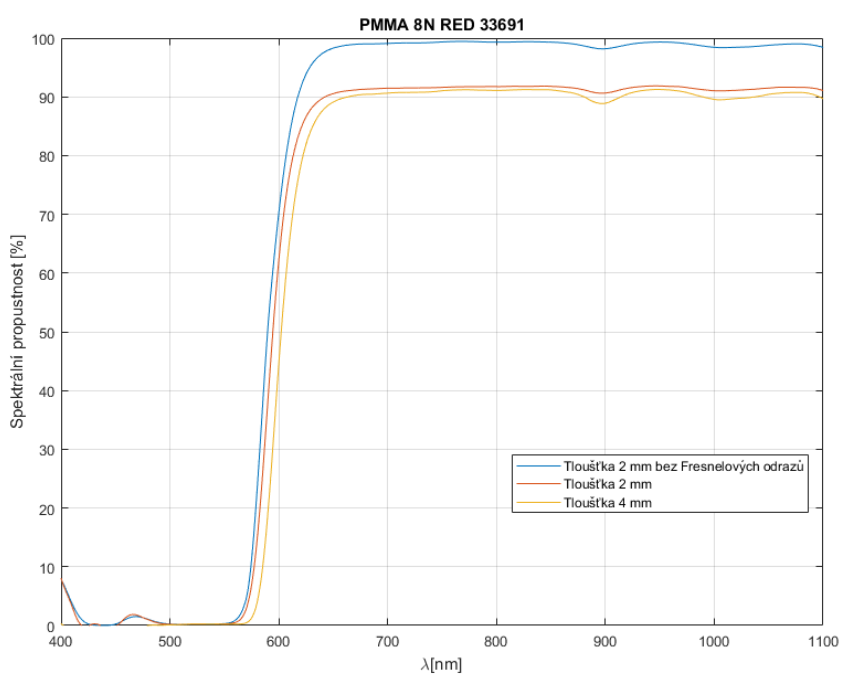
### A Výsledné grafy spektrální propustnosti ve formě destiček



Obrázek 37: PMMA 8N RED 3V124

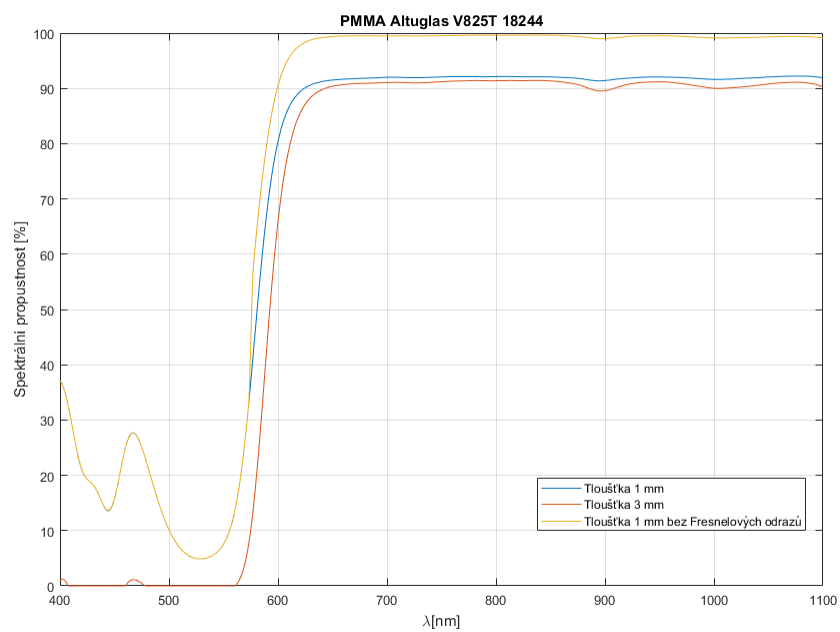


Obrázek 38: PMMA Altuglas V825T 28226



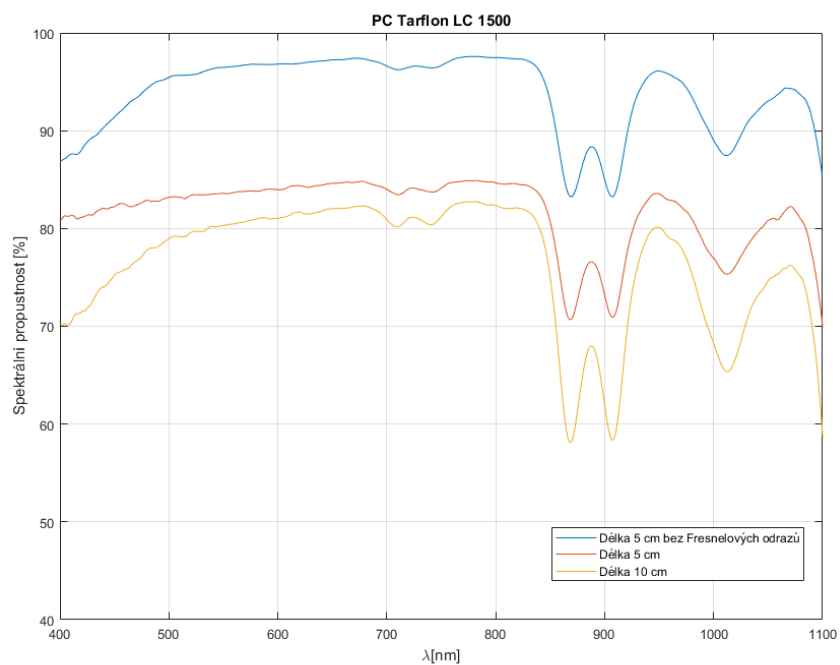
Obrázek 39: PMMA 8N RED 33691



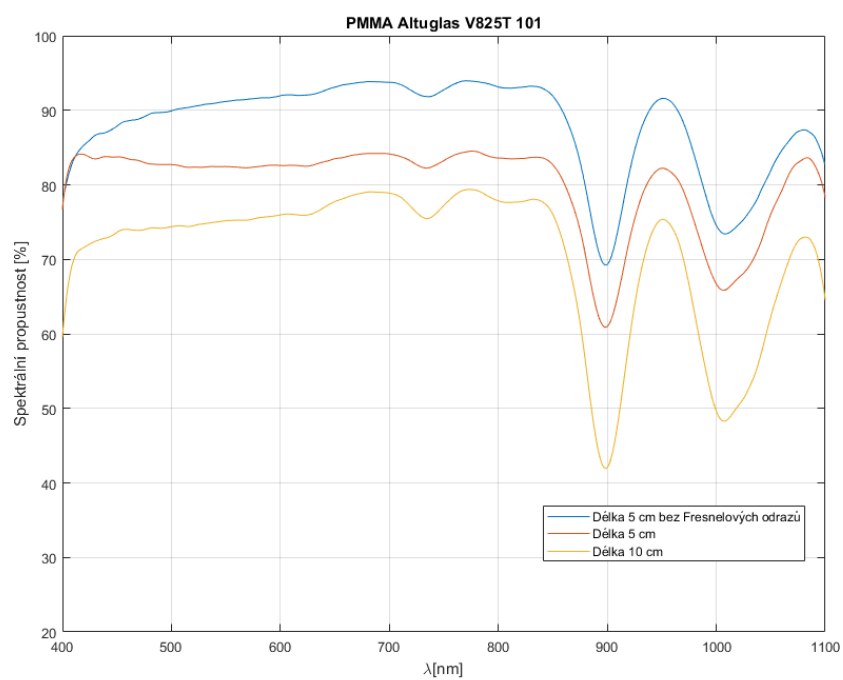


Obrázek 40: PMMA Altuglas V825T 18244

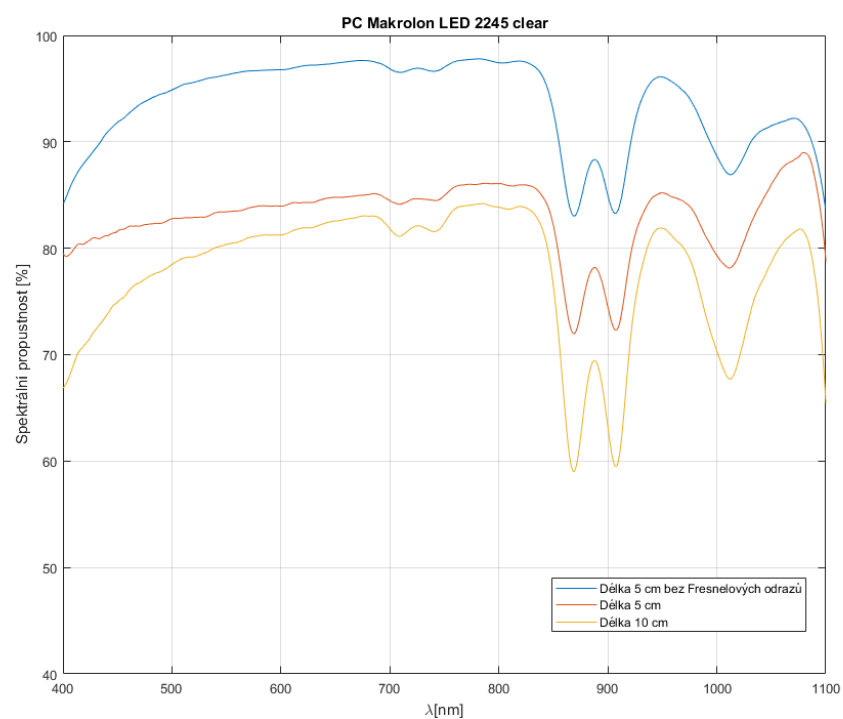
## B Výsledné grafy spektrální propustnosti ve formě tyčinek



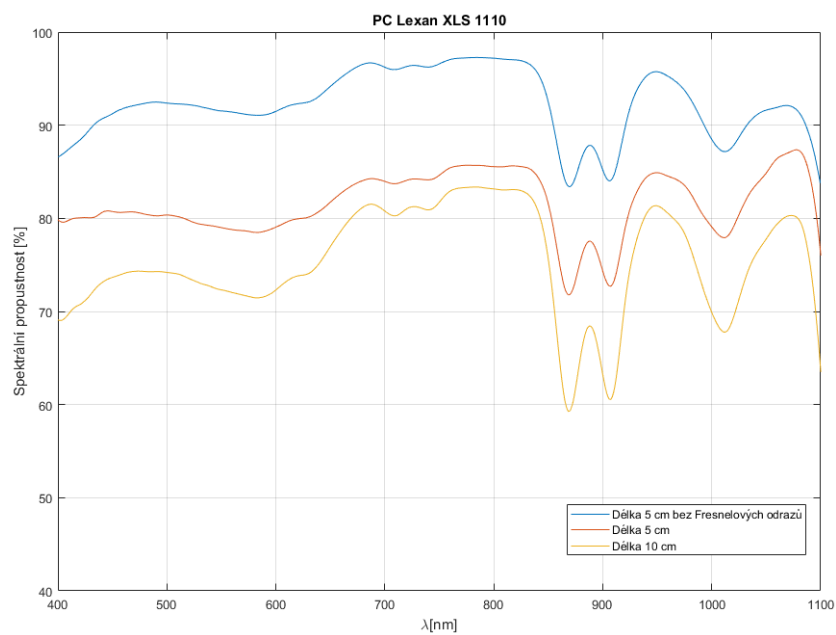
Obrázek 41: PC Tarflon 1500



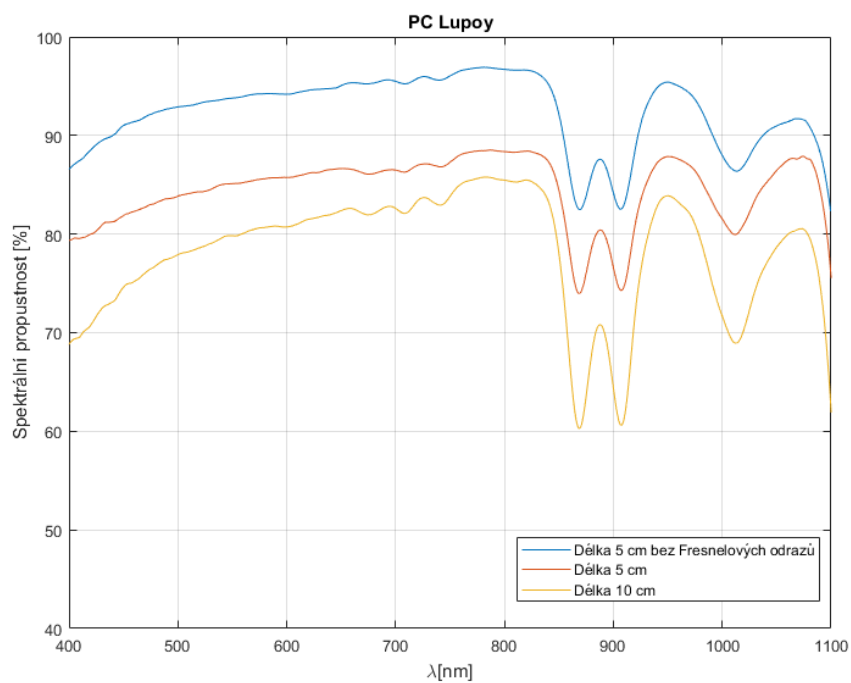
Obrázek 42: PMMA Altuglas V825T 101



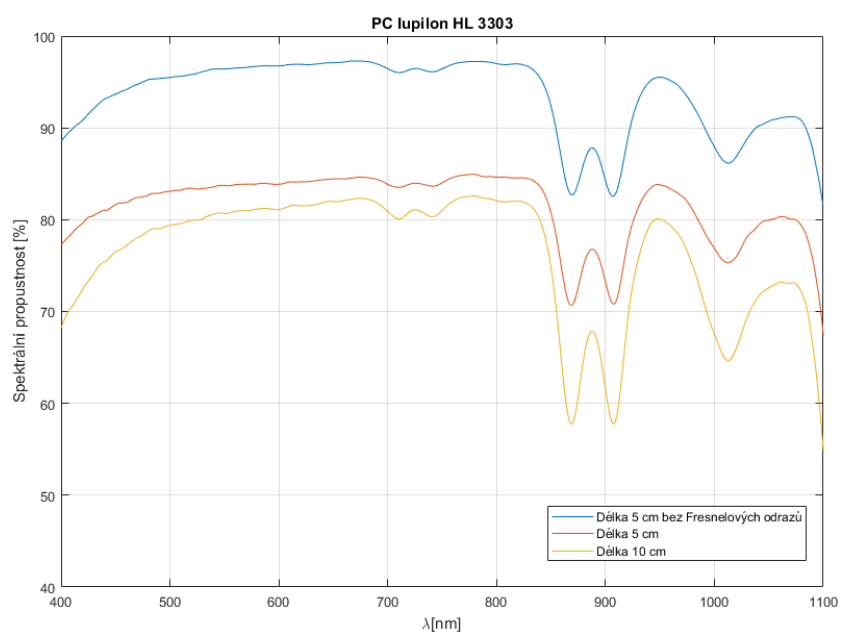
Obrázek 43: PC Makrolon LED 2245 clear



Obrázek 44: PC Lexan XLS 1110



Obrázek 45: PC Lupoy



Obrázek 46: PC Iupilon HL 3303